AGOSTO 2009

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MATEMATICAS
El experimento de Fermi, Pasta y Ulam

GENETICA
Mutaciones silenciosas ¿Son realmente inocuas?

FISICA
Láseres de largo recorrido

EVOLUCION
¿Dónde y cuándo se domesticó el gato?

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

PLANETAS EXOTICOS

Sistemas planetarios alrededor de estrellas muertas y enanas marrones

SUMARIO

Agosto de 2009/ Número 395

28

Aunque no alteran la composición de las proteínas, las mutaciones "silenciosas" pueden resultar dañinas.

22

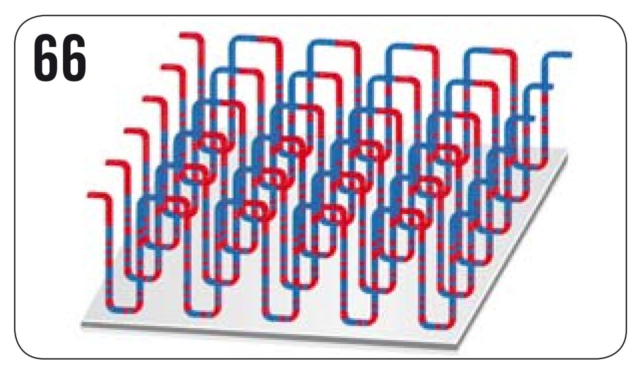
La recolección de las cosechas rompe el ciclo natural al detraer fósforo de la tierra.

40

Interacciones entre el medio y el genoma de las abejas.

ARTICULOS

No sólo hay planetas alrededos de estrellas como el Sol.



Una nueva forma de almacenar datos.

82

La cuarta parte de nuestros alumnos de quince años tienen un nivel de competencia lectora igual o inferior al mínimo establecido.

SECCIONES

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

ACTING EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, John Rennie, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Kevin Hause
VICE PRESIDENT, OPERATIONS AND ADMINISTRATION Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE AND GENERAL MANAGER Michael Florek

DISTRIBUCION

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Planetas ectópicos*; Juan Manuel González Mañas: *Mutaciones silenciosas*; I. Nadal: *El sino de Ugarit*; Joandomènec Ros: *La domesticación del gato*; Luis Bou: *Memorias* racetrack*, Fermi, Pasta, Ulam y el nacimiento de la matemática experimental* y *Apuntes*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Ciencia y sociedad*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; J. Vilardell: *Hace..., Ideas aplicadas y Curiosidades de la física*

Portada: Phil Saunders de Space Channel Ltd.

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Olas. «Al hombre le agradaría descubrir los caminos de las olas sin más que observarlas, pero no le resulta posible, porque las olas disparan su ensueño. Trate alguna vez de contar cien olas y lo verá. Las preguntas que formulan los observadores del oleaje se están respondiendo mediante estudios intensos sobre el mar y el examen de las olas e grandes estanques experimentales. Los nuevos conocimientos han posibilitado la medición de la energía y los efectos de las olas para beneficio de quienes trabajan en el mar y en los litorales. En el enorme estanque del Instituto Stevens de Técnica de Hoboken, Nueva Jersey, unas olas artificiales remedan por su irregularidad y su variabilidad las olas de alta mar. En la fotografía, la maqueta de barco se mueve por sus propios medios; el instrumento instalado encima de ésta registra sus movimientos.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. 201, N.º 2; AGOSTO DE 1959

...cien años

Visitante celeste. «El acercamiento del cometa Halley constituye el acontecimiento astronómico más importante de los años 1909 y 1910. Cada setenta y cinco o setenta y seis años, este sorprendente cuerpo completa una de sus muy excéntricas y elípticas órbitas alrededor del Sol. Fue visto por última vez en mayo de 1836 por el Observatorio Cape, pero aunque se desvaneció de la vista de los hombres, su ruta de avance por el espacio se conocía con la exquisita precisión con la que los marineros conocen el rumbo de un barco en un mar inexplorado. No es poca la emulación presente entre los observatorios dotados de telescopios de gran tamaño, para ver cuál de ellos será el primero en captar, a tan lejanas costas, el retorno de nuestro viajero.»

Proto-televisión. «El señor Ernst Ruhmer, de Berlín, famoso por sus inventos en el campo de la telefonía y telegrafía sin hilos, ha logrado perfeccionar el que probablemente sea el primer aparato de pruebas del que pueda decirse que ha resuelto el problema de la tele-visión. Este redactor ha tenido la oportunidad de inspeccionar esa curiosa máquina inmediatamente antes de que fuese enviada a Bruselas, para ser expuesta ante los promotores de la Exposición Universal del año que viene. De hecho, un aparato de tele-visión completo y definitivo, que cuesta la friolera de un millón y cuarto de dólares, será sin duda la gran atracción de esta exposición.»

El triunfo de Blériot. «El espectacular vuelo de Louis Blériot de un lado al otro del Canal de la Mancha supone un hito en la historia del progreso que no debería caer en el olvido. No habrá nadie, desde luego, tan injusto que menosprecie esta hazaña comparándola con vuelos anteriores y de recorrido más largo. En punto a riesgo y audacia, ese osado y madrugador *sprint* sobre el Canal define por sí mismo toda una categoría. El hecho de que la primera máquina voladora que haya cruzado el Canal fuera un modelo monoplano ha elevado el prestigio de ese tipo de aparatos.»

...ciento cincuenta años

Tumbas de oro. «Los aborígenes de América Central, que la ocupaban cuando fue descubierta por los blancos del Este, acostumbraban a enterrar rodeados de oro a sus muertos. Nos llegan noticias de nuevos descubrimientos en David, Chiriqui (Panamá). Hay ahora una gran emigración hacia esas nuevas excavaciones arqueológicas; los informes hablan de oro en profusión. Pero nos inclinamos a creer que, tras haber sido el país profundamente saqueado en el siglo dieciséis, no puede haber tanto como los rumores nos hacen creer. Son figuras fundidas y pulidas, que muestran un sutil ingenio en el modelado. Las gentes que crearon tales objetos debían poseer un alto grado de civilización. El estudio de las antigüedades americanas progresará sin duda gracias al descubrimiento de tan extraordinarias figuras; somos de la opinión de que deben preservarse y no arrojarse al crisol del refinador como si fueran pepitas de oro en bruto o polvo herrumbroso.»

MAQUETA DE UN BARCO, de un metro y medio de longitud, ensayada en un tanque de olas, 1959.

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Células de combustible

La progresión hacia los vehículos propulsados por hidrógeno depende de que se logren sistemas de células de combustible que conjuguen menor coste y mayor capacidad [*véase* "Automoción por pilas de combustible"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2005]. Mucho se ha avanzado en ambos problemas. Un equipo de Quebec ha presentado una fórmula que utiliza hierro, en lugar del carísimo platino, para catalizar la reacción electrogénica del hidrógeno y el oxígeno.

La clave reside en unas estructuras de carbono que contienen poros microscópicos, rellenos de hierro para crear una gran cantidad de puntos de actividad química. La sustancia, de base férrica, descrita en *Science* del 3 de abril, produjo una actividad catalítica que rondaba el 10 por ciento de las mejores versiones con platino, y era 35 veces mayor que la de catalizadores anteriores no basados en metales preciosos.

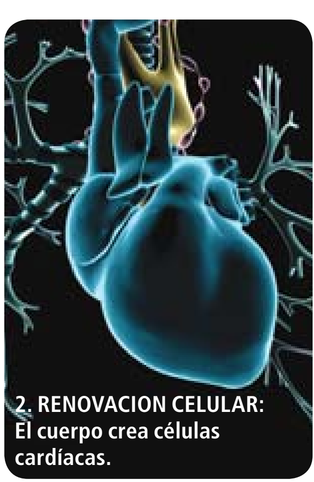
1. CAMBIO DE ENERGIA MOTRIZ. Nuevos materiales pueden hacer más factible la propulsión por hidrógeno de los automóviles.

La búsqueda de materiales que puedan almacenar hidrógeno para proporcionárselo a células de combustible se está orientando asimismo hacia los poros. Un equipo de la Universidad de Michigan en Ann Arbor afirma haber creado un material dotado de una superficie excepcionalmente adecuada para la adsorción de gases. Esta "esponja de hidrógeno" consiste en apiñamientos de óxido de cinc unidos por un material orgánico; un gramo ofrece una superficie de adsorción de unos 5000 metros cuadrados, casi un campo de fútbol. Se pueden ver detalles de esta sustancia, denominada UMCM-2, en *Journal of the American Chemical Society* del primero de abril.

Células cardíacas de la era atómica

En los años cincuenta del siglo pasado, los ensayos nucleares en la atmósfera dispersaron por todo el mundo carbono 14 radiactivo y otros isótopos. Las plantas los absorbieron, los animales devoraron las plantas y los humanos, a unos y a otras, creando sin proponérselo una oportunidad experimental para Jonas Frisén y sus colaboradores del Instituto Carolinska de Estocolmo.

Los investigadores suecos han utilizado la desintegración del carbono 14 de la era atómica como marcador biológico con el fin de determinar la frecuencia de renovación de las células de nuestro organismo. Con esos datos han resuelto un viejo problema: han demostrado que el corazón humano produce células cardíacas nuevas. La tasa anual de renovación es del 1 por ciento a la edad de 25 años y decrece hasta el 0,45 por ciento a los 75; en total, a los 70 años han sido reemplazados alrededor del 40 por ciento de los cardiomiocitos. Este descubrimiento, publicado en *Science* del 3 de abril, lleva a pensar que las lesiones cardíacas podrían repararse mediante la estimulación de los mecanismos de renovación.



2. RENOVACION CELULAR: El cuerpo crea células cardíacas.

Avisos a la velocidad del rayo

Las tormentas podrían volverse más intensas con el calentamiento global [*véase* "Océanos más cálidos y huracanes más fuertes"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2007]. En un estudio de 57 huracanes se ha observado que el aumento del aparato eléctrico tendía a preceder en un día a los vientos más fuertes. Durante la vigilancia del huracán Dennis, de 2005, se registró una intensificación de los relámpagos (de 600 al día a 1500), casi 24 horas antes de que se duplicase la velocidad del viento, que llegó a los 240 km/h.

Será necesario recoger más datos antes de que esa correlación, comunicada en línea en *Nature Geoscience* del 6 de abril, pueda considerarse un predictor de la intensidad de una tormenta.

No tan salvadora

Se ha venido dudando, desde hace bastantes años, del valor de los análisis de sangre para la detección del cáncer de próstata, la llamada prueba PSA [*véase* "Pruebas para la detección precoz del cáncer de próstata"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1996]. Después de todo, el progreso de la mayoría de los cánceres de próstata es lento, y en ocasiones nunca llegan a plantear problemas, mientras que los tratamientos podrían provocar impotencia e incontinencia urinaria. Los primeros resultados de estudios de gran amplitud todavía en curso, realizados en EE.UU. y Europa, publicados en *New England Journal of Medicine* del 26 de marzo, parecen indicar que la prueba PSA no contribuye a salvar muchas vidas.

En el estudio estadounidense no se ha observado reducción de la mortalidad resultante de los exámenes de próstata en un colectivo objeto de seguimiento durante 11 años. En el europeo, cuyos protocolos eran distintos, sí se apreció un descenso del 20 por ciento en la mortalidad, que se traduce en 7 fallecimientos menos por cada 10.000 sujetos examinados y observados durante 9 años. Habrá que esperar a trabajos posteriores para esclarecer algunas de las diferencias entre ambos estudios.

FISIOLOGIA

Albinismo

El albinismo constituye una enfermedad genética responsable de la pérdida parcial o completa de pigmentación, es decir, del color de la piel, los ojos o el pelo. Está causada por mutaciones que afectan a los melanocitos, las células productoras del pigmento melanina que da color a esas partes del cuerpo. En los individuos con albinismo, ciertas alteraciones genéticas impiden en los melanocitos la síntesis de pigmento o dificultan su distribución hasta los queratinocitos, el principal tipo de células de la epidermis.

Las formas habituales de albinismo corresponden a las variantes oculocutáneas de tipo 1 (OCA1) y de tipo 2 (OCA2). Quienes sufren de OCA1 experimentan mutaciones en el gen *TYR*, responsable de la producción de tirosinasa, enzima utilizada por las células para convertir la tirosina, un aminoácido, en pigmento. OCA2, que es la variante más frecuente en Africa, resulta de una mutación del gen *OCA2* que codifica la proteína P, una proteína cuyo papel no acaba de descifrarse. Es probable que esta mutación sea la más antigua entre las causantes de albinismo; según se cree, se originó durante el desarrollo de la humanidad en Africa.

Casi todos los albinos con OCA1 tienen la piel blanca, el pelo blanco y ojos sin pigmentación. El iris, la región circular y coloreada que circunda a la pupila, se ve descolorido, y la pupila, roja. Esta rojez se debe al reflejo de la luz en los vasos sanguíneos de la retina, revestimiento sensible a la luz que recubre por su interior el fondo del globo ocular. Normalmente las pupilas se ven negras porque los pigmentos moleculares de la retina absorben la luz e impiden que se refleje y salga al exterior. Quienes tienen OCA2 pueden producir una pequeña cantidad de pigmento y, por ello, presentar síntomas oculares menos pronunciados.

COPITO DE NIEVE, gorila albino.

Los individuos que sufren albinismo reciben a menudo la consideración de legalmente ciegos. Al carecer de melanina durante el estadio embrionario, los tractos neuronales que llevan desde el ojo hasta la corteza visual del cerebro se desarrollan de forma aberrante, lo cual provoca una percepción deficiente de la profundidad. Y los fotorreceptores de la retina, al carecer el ojo de pigmento, pueden resultar sobreestimulados y enviar al cerebro mensajes que le confundan; con frecuencia producen también nistagmus, un tipo de movimiento involuntario de los ojos.

La carencia de pigmentación epidérmica aumenta la susceptibilidad a cánceres de piel no melanomas, como los carcinomas de células escamosas o los de células basales. Los melanocitos de funcionamiento normal suministran, a los queratinocitos, pigmentos que protegen a los núcleos celulares (y al ADN que alberga) de las radiaciones ultravioleta del Sol. Las personas con albinismo pueden también experimentar un envejecimiento prematuro de la piel, porque la melanina, al bloquear los rayos UV, contribuye a impedir las arrugas y la pérdida de elasticidad de la piel.

Richard King, de la Universidad de Minnesota, Vitali Alexeev, de la Universidad Thomas Jefferson, y otros están trabajando en terapias génicas y en fármacos que corrijan las mutaciones responsables del albinismo. Se han logrado ciertos éxitos en la corrección de parcelas de piel y pelo despigmentado en ratones, pero falta un largo trecho para que estas investigaciones puedan trasladarse a los seres humanos.

—*Raymond Boissy*,
profesor de dermatología,
facultad de medicina
de la Universidad de Cincinnati

ARQUEOLOGIA

Los primeros caballos domesticados

La domesticación de los caballos cambió el curso de la Historia. El punto de partida parece remontarse al menos 5500 años en el pasado, hasta los botai, una tribu que vivía en lo que ahora es el norte de Kazajistán. Se han encontrado restos de leche de yegua en nueve antiguos recipientes de barro para cocinar de esa zona, así como huellas de daños en quince mandíbulas de caballo causados por frenos o bridas, lo cual sugiere que los botai tenían caballerizas. Estos hallazgos se describen en *Science*.

—*David Biello*

LOS INDICIOS DE LECHE DE YEGUA en vasijas kazajas de hace 5500 años apuntan a que para entonces ya estaban domesticados los caballos.

CESAR RANGEL *AFP/Getty Images; (Copito de nieve)* ALAN K. OUTRAM *AP Photo (caballo)*

PALEOANTROPOLOGIA

Un mismo estilo de vida

Los datos presentados en abril en la reunión de la Sociedad de Paleoantropología en Chicago apuntan a que el comportamiento de los neandertales se parecía al de los seres humanos modernos primitivos. Bruce Hardy, de la Universidad Kenyon, ha estudiado artefactos de Hohle Fels, yacimiento de Suabia, donde se han hallado herramientas fabricadas por los neandertales entre hace 36.000 y 40.000 años, así como objetos creados por seres humanos modernos primitivos entre hace 33.000 y 36.000 años. Ambos grupos vivieron en condiciones ambientales similares en la zona de ese yacimiento, lo cual hace que sus restos sean ideales para realizar comparaciones.

Hardy examinó el desgaste y los residuos de las herramientas y encontró que, aunque los seres humanos modernos tenían una gama más amplia de artefactos, ambos grupos se dedicaban a actividades similares, como el uso de la resina de árboles para pegar puntas de piedra a mangos de madera y la fabricación de herramientas a partir de hueso y madera. Conjetura que los neandertales no inventaron más herramientas porque podían sobrevivir perfectamente con las que tenían.

—Kate Wong

Hohle Fels, la cueva donde se han encontrado los más antiguos objetos artísticos indubitables que se conocen.

ASTRONAUTICA

Orbitas en colisión

Un satélite ruso y un satélite comercial, propiedad de Iridium, una empresa norteamericana de comunicaciones, chocaron a 800 kilómetros de altitud sobre Siberia. Cosa nada imposible, visto el número de objetos en órbita: en los últimos 20 años se produjeron otros tres accidentes, aunque de menor importancia, pues sólo produjeron unas pocas piezas sueltas. Pero en este último impacto los fragmentos a la deriva son centenares. Algunos han descendido hasta la altura de la Estación Espacial Internacional, para la que suponen un riesgo, aunque pequeño, real.

—John Matson

DATOS

Fusión láser

El 29 de mayo, el Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore inauguró las Instalaciones Nacionales de Ignición de Estados Unidos, el mayor sistema láser del mundo. Dirigirá rayos láser procedentes de todas las direcciones hacia una bola de hidrógeno congelado del tamaño de un guisante, alojada en un tubo, un *hohlraum* (una cavidad); la calentará hasta una temperatura de millones de grados y provocará la fusión. Los rayos láser deben recorrer cierta distancia para ir recogiendo energía de amplificadores antes de golpear su pequeño blanco. El laboratorio compara la precisión necesaria con la de un lanzador que enviase una pelota desde el estadio AT&T Park de San Francisco hasta el estadio Dodger de Los Angeles. Esta instalación, diseñada para asegurarse de que las cabezas nucleares de los Estados Unidos funcionan correctamente sin necesidad de pruebas reales, proporcionará también un medio para estudiar el interior de las estrellas y la fusión como fuente de energía.

Número de rayos láser que golpean el blanco: 192

Número de "puntos de control" para amplificar y mantener los rayos: 60.000

Distancia que recorre el láser: 1 kilómetro

Tiempo en el que todos los rayos deben golpear el blanco, en billonésimas de segundo: 30

Energía transmitida al blanco, en joule: 1,8 millones

Estimación inicial del coste: 1100 millones de dólares

Estimación inicial de tiempo de construcción: 6 años

Coste final: 3500 millones de dólares

Tiempo de construcción: 12 años

FUENTES: Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore; "Beyond the Test Ban", por John Horgan; Scientific American, *diciembre de 1996*

DR. EUGEN LEHLE (*Hohle Fels*); MATT COLLINS (*ilustración*)

Contaminación genética en la perdiz roja

Estudios genéticos demuestran que la perdiz roja se está cruzando, de forma clandestina, con perdiz turca procedente de China

La perdiz roja (*Alectoris rufa*) es, sin duda, la especie de caza menor más importante en la península Ibérica. Cada año se cobran varios millones de ejemplares, que reportan cuantiosos ingresos, directos e indirectos, sobre todo si se tiene en cuenta que las regiones más adecuadas para la práctica cinegética carecen a menudo de grandes recursos económicos. Una buena gestión de las poblaciones y de su hábitat resulta fundamental para la conservación de la especie; asimismo, beneficia al conjunto de los ecosistemas en los que medra.

Nos propusimos hace años estudiar la variabilidad genética de las poblaciones naturales de la perdiz roja. Interesaba evaluar posibles efectos nocivos de una caza excesiva, pues los cuellos de botella derivados de la disminución en el tamaño de las poblaciones causan pérdidas notables de variabilidad genética. Importaba también determinar las poblaciones que mantenían niveles elevados de diversidad, con vistas a conservarlas y a poderlas utilizar para la repoblación de áreas más afectadas.

Amenaza cinegética

La gran demanda cinegética supera ampliamente la productividad de las poblaciones naturales. Tal déficit se compensaría con repoblaciones y sueltas de animales criados en granja. En las sueltas, los animales se liberan pocos días antes de la celebración de las partidas de caza; las repoblaciones, en cambio, se realizan al acabar la temporada, para preparar la del año siguiente. En ambos casos, aunque más en el segundo, pueden sobrevivir en el campo algunos de los animales liberados. La repoblación suscita también múltiples interrogantes. Por lo pronto se corre el riesgo de extender a las poblaciones naturales problemas sanitarios, como la coccidiosis, habituales en la cría de animales hacinados.

Asimismo, un censo elevado no es sinónimo de estabilidad, variabilidad ni de que los genotipos de los animales liberados sean los más adecuados. ¿De dónde proceden los reproductores de las granjas de cría? ¿De cuántos reproductores se disponen? ¿Qué política de reproducción se aplica, si es que hay alguna? ¿Hay consanguinidad? Resulta casi imposible conseguir toda esa información, pese a la importancia que supone para la conservación de la perdiz roja.

Genes intrusos

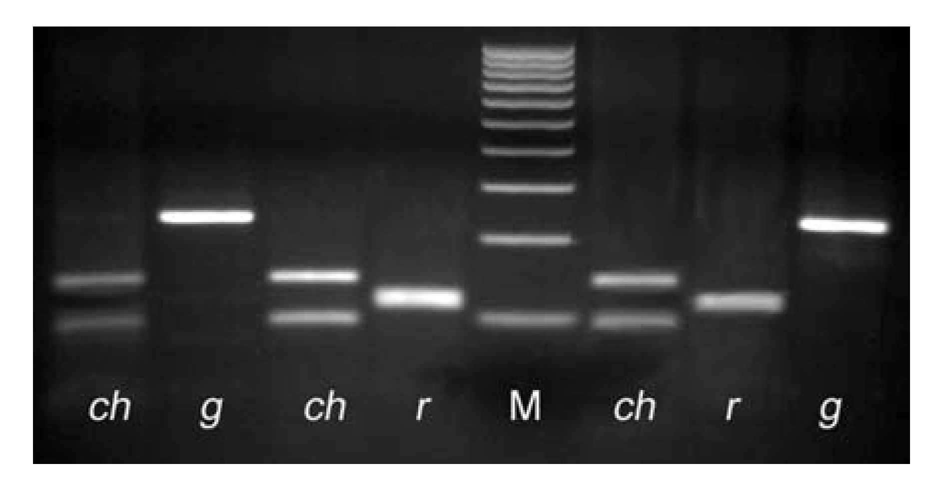
La suelta de animales criados en granja ha dado pie a otro problema de mayor gravedad si cabe: la introgresión de material genético de otras especies. El género *Alectoris* comprende varias especies parapátricas (originadas por aislamiento reproductivo entre poblaciones contiguas). *A. rufa* ocupa la península Ibérica, islas Baleares y el sur de Francia; también se ha introducido en Inglaterra y en algunos puntos de Italia. En el norte de Africa y en las Canarias medra la perdiz moruna (*A. barbara*); en el sudeste francés, *A. rufa* se solapa con *A. graeca*, también conocida como perdiz griega o perdiz de roca, que se extiende por Italia y los Balcanes hasta Grecia. A partir de allí se encuentra la perdiz turca (*A. chukar*), con una amplísima distribución que abarca desde las islas griegas y Turquía, por Asia central, hasta el Extremo Oriente. En Asia aparecen también otras dos especies con distribuciones más limitadas, *A. magna* y *A. melanocephala*.

El concepto de especie en el género *Alectoris* es borroso, puesto que algunas especies hibridan entre sí y sus híbridos son fértiles. En las zonas donde se solapan las distribuciones, existen híbridos naturales entre las perdices roja y griega, así como entre las perdices griega y turca; en las granjas, roja y turca hibridan también.

Sin embargo, la perdiz griega y la turca son más fáciles de criar en cautividad que la perdiz roja. Por ello, y a pesar de que la legislación prohíbe la liberación de especies, híbridos o razas que pongan en peligro la pureza de las poblaciones autóctonas, la introducción de estas especies resulta muy atractiva de cara a aumentar la producción de las granjas de cría. Las tres especies difieren en aspecto y en comportamiento en el campo; así, la perdiz roja se caracteriza por el color de las patas que le dan el nombre y, sobre todo, por el collar de plumas oscuras que reviste su pecho).

Los híbridos son más difíciles de distinguir. Requieren una observación más fina. La hibridación conduce a la introgresión, es decir, la mezcla de genes procedentes de especies o subespecies alóctonas. Puesto que las poblaciones locales de perdiz roja presentan una serie de ras-

1. Perdiz roja (*Alectoris rufa*).



2. La combinación de digestión enzimática y electroforesis permite diferenciar el ADN mitocondrial de varias especies de perdiz: perdiz turca (*A. chukar*, *ch*), perdiz griega (*A. graeca*, *g*) y perdiz roja (*A. rufa*, *r*). (*M* corresponde al marcador de peso molecular.)

gos que les confieren una perfecta adaptación al medio, tal contaminación genética podría causar serios daños al futuro de la especie. Hace años que los cazadores experimentados, que prefieren la perdiz autóctona, se quejan de la presencia de ejemplares con fenotipos y comportamientos impropios de una perdiz roja.

¿Griega o turca?

Las primeras sospechas de hibridación recayeron sobre la perdiz griega. Se sabía que existían en Francia híbridos naturales y que en granjas experimentales hibridaban con facilidad.

Nosotros empezamos por estudiar el ADN mitocondrial; en concreto, parte de la región de control (*D-loop*), una secuencia de algo más de mil nucleótidos, que incluye dos segmentos de variabilidad elevada. Ettore Randi, del Instituto Nacional para la Fauna Selvática de Bolonia, había descrito las secuencias de la región de control que diferenciaba unas especies *Alectoris* de otras. Por otra parte, se tenían pocos datos sobre la variación dentro de cada especie.

Emprendimos un estudio de perdices rojas procedentes de poblaciones ibéricas de condiciones diversas. Hallamos una variabilidad notable, así como una clara introgresión genética. En nuestro estudio no apareció ninguna secuencia correspondiente a la perdiz griega. De donde se desprendía que, o bien la hibridación con ésta no se estaba produciendo o, si ocurría, no dejaba rastro en las poblaciones, tal vez por ser los híbridos poco competitivos. Sí hallamos secuencias típicas de la perdiz turca: aparecieron de forma masiva en alguna granja de cría (hasta el 50 por ciento de los individuos muestreados), en menor frecuencia en poblaciones bastante explotadas en cuyas proximidades se efectúan sueltas y de forma ocasional en animales de regiones que supuestamente habían estado siempre alejadas de posibles repoblaciones.

Pronto aparecieron datos de otros grupos del Instituto de Investigación en Recursos Cinegéticos de Ciudad Real, la Universidad de Zaragoza y el Instituto Nacional para la Fauna Selvática en Bolonia, que indicaban igualmente la presencia de genotipos de *A. chukar* en *A. rufa*, españolas e italianas. Está claro que entre estas dos especies se puede descartar una posible contaminación natural o accidental desde poblaciones próximas, pues las perdices turcas más cercanas se hallan en las islas griegas y en Turquía.

¿De dónde procedía la contaminación? *A. chukar* presenta una extensa distribución que comprende Turquía, Próximo Oriente, Kazaquistán y otros países del Asia central, y China hasta Manchuria, con cierta diferenciación genética en varias subespecies. Se ha secuenciado el segmento variable de la región de control mitocondrial de animales originarios de distintos puntos. Lógicamente, las secuencias obtenidas de una misma especie guardan siempre una semejanza notable; sin embargo, entre los 243 pares de bases analizados del segmento variable del *D-loop* de *A. chukar* hallamos 25 puntos polimórficos.

La conexión china

La historia de los haplotipos puede reconstruirse a través de un sistema de redes que relaciona las secuencias que guardan mayor semejanza. Se trata de inferir qué mutaciones tuvieron que ocurrir para formar un haplotipo a partir del otro. Si existe relación entre distancia genética y distancia geográfica —como suele ocurrir en poblaciones naturales—, estas redes filogenéticas pueden superponerse sobre la distribución de la especie.

Las secuencias de *A. chukar* se agrupan en dos grandes clados, que guardan relación con la distribución geográ-

3. Red filogenética que relaciona las secuencias de ADN mitocondrial de la perdiz turca (*A. chukar*). Cada círculo representa un haplotipo; su diámetro es proporcional al número de individuos hallados con esa secuencia; la longitud de la línea que los une es proporcional al número de mutaciones en que difieren dos secuencias. Se distinguen los grupos de haplotipos hallados en la parte occidental de la distribución de la especie (*naranja*) de los hallados en la parte oriental (*amarillo*). Las secuencias típicas de perdiz turca observadas en perdices rojas españolas (*azul*) e italianas (*verde*) se corresponden con el grupo oriental.

fica: uno representa a las secuencias obtenidas de las poblaciones occidentales (Turquía, islas del Egeo, Israel y Georgia); otro a las orientales (Asia central y China).

Introdujimos en la comparación las secuencias de *A. chukar* que, según nuestros hallazgos, contaminaban las perdices rojas ibéricas y las que, según el grupo de Barilani, contaminaba las italianas. Para nuestra sorpresa, todas mostraron un gran parecido a ciertos haplotipos encontrados en China. Los resultados indican, pues, que los *stocks* de *A. chukar* que se están empleando de forma clandestina para cruzar con la perdiz roja proceden de China.

No resulta fácil trazar los orígenes comerciales de esta contaminación. Está claro que en algún momento se importaron perdices turcas de Extremo Oriente (si es que no se sigue haciendo todavía). Es muy posible que en algún punto de la península Ibérica o del sur de Francia se estén manteniendo esos linajes y cruzando con la perdiz roja, cuyos descendientes se acabarán liberando en cotos de caza.

Podría parecer superfluo advertir a quienes están realizando actos fraudulentos que no deberían hacerlo. Sin embargo, de ahora en adelante podría suceder que, por falta de controles genéticos, algunos criadores y responsables de cotos no sean conscientes de la presencia de híbridos en los animales que compran o sueltan. No se trata sólo de un problema de legalidad. La detección y erradicación de la hibridación con especies alóctonas repercute sólo para el bien de la conservación de un recurso tan importante como la perdiz roja.

María Martínez Fresno
Nuno Henriques Gil
Laboratorio de Genética
Universidad CEU San Pablo

Pilar Arana
Depto. de Genética, Facultad de Biología
Universidad Complutense de Madrid

Nanoantenas ópticas

Más allá del límite de difracción

No se puede, nos enseña la física, focalizar la luz más allá de cierto límite. Sin embargo, en el Instituto de Ciencias Fotónicas hemos conseguido una herramienta que concentra la luz en un punto 10 veces menor que lo que permite la más perfecta de las lentes. El objeto, en forma de antena nanoscópica, abre la puerta a numerosas aplicaciones. De hecho, el punto de luz ultraconcentrada se ha utilizado ya para atrapar bacterias sin dañarlas.

La física impone un límite infranqueable a la luz: resulta imposible focalizarla a una dimensión menor que una fracción de su longitud de onda. Este umbral, el límite de difracción, explica por qué un microscopio óptico no puede ver objetos infinitamente pequeños. Asimismo, determina la sección mínima que debe tener una fibra óptica para guiar una señal luminosa.

Hasta hace poco se pensaba que nunca podría explorarse, por medios ópticos, la materia a una escala muy inferior al límite de difracción. El mundo nanométrico quedaba, pues, excluido de esa exploración. No obstante, sería de desear un control tan fino de la luz, para mejorar la resolución de los microscopios y la miniaturización de los circuitos ópticos. Por no hablar de la posible resolución de numerosas incógnitas y a la superación de una multitud de retos físicos y médicos.

Nuestro trabajo se centra en la interacción entre la luz y cantidades ínfimas de materia (una o pocas moléculas). La comprensión y optimización de esa interacción allanarían el camino hacía el desarrollo de nanoláseres, sensores ultracompactos y ultra-sensibles y otras nanoherramientas. Los expertos en nanoóptica se afanan por encontrar nuevas vías de manipular la luz por debajo del límite de difracción.

De antenas de radio a antenas ópticas

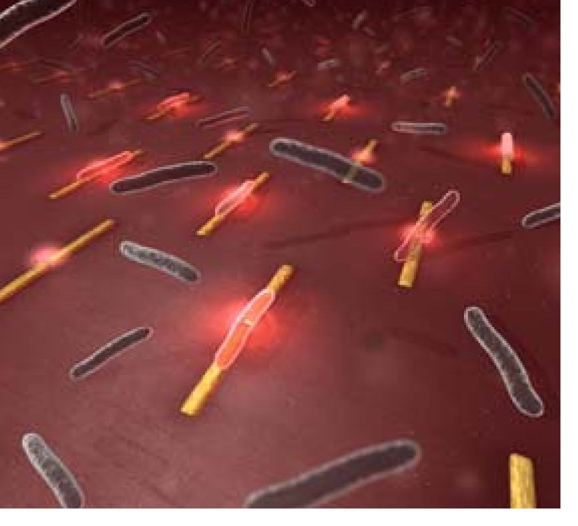
En nuestro laboratorio hemos desarrollado una intensa fuente de luz de escala nanométrica. Inspirados en las antenas instaladas en los tejados, que operan a modo de eficientes receptores de señales de frecuencias de radio, hemos aplicado el concepto de antena al mundo de las frecuencias ópticas.

La parte activa de las antenas de radio consta de dos barras de metal acopladas a un cable coaxial que se conecta al televisor. La longitud de las barras está determinada por una fracción de la longitud de onda que se quiere detectar, típicamente de unas decenas de centímetros. Podemos así aprovechar la resonancia de la antena y maximizar la recepción y el acoplamiento de la señal recibida con el cable.

Nuestra nanoantena óptica consta de dos barras metálicas; cada una mide 500 nanómetros de longitud. Se encuen-

MINIATURIZACION

La nanoantena óptica (*izquierda*) guarda semejanza con una antena de radio (*derecha*): ambas constan de dos barras metálicas acopladas. La principal diferencia reside en el tamaño: las nanoantenas ópticas son unas 100.000 veces más pequeñas que las de radio.



Las nanoantenas ópticas se han utilizado a modo de pinzas para inmovilizar bacterias vivas.

tran separadas por un espacio de aire de sólo 30 nanómetros. Son los valores necesarios para aprehender longitudes de onda ópticas, que rondan los 500 nanómetros, mucho menores que las de radio (100.000.000 nanómetros). Para cumplir las condiciones favorables de resonancia, la estructura óptica debe ser, pues, más de 100.000 veces inferior a la de radio.

La idea parece sencilla, pero la miniaturización de una antena entraña cierta dificultad. El comportamiento del metal que compone las barras cambia mucho cuando se modifica la frecuencia de la radiación con la cual interacciona. Cuando ésta se halla en el rango de las frecuencias de radio, los metales parecen conductores perfectos. En cambio, cuando las frecuencias son ópticas, el metal sufre una poderosa absorción, con importantes pérdidas por calentamiento y con merma consiguiente del rendimiento de la antena.

Resonancia plasmónica

Para superar esa dificultad, se ha utilizado un metal con notables propiedades ópticas: el oro. Las nanoestructuras de metales nobles (como el oro y la plata) dan lugar a la resonancia plasmónica. Este fenómeno óptico resulta en campos de gran intensidad, que se generan, bajo una iluminación adecuada, en la superficie del metal; los campos generados permiten compensar la absorción intrínseca del metal.

Combinando la idea de antena con conceptos de óptica plasmónica, hemos diseñado una antena óptica de una micra de longitud, que recolecta la luz y la concentra en un punto localizado en un espacio de 30 nanómetros, entre las dos barras de oro. Supera, pues, el límite de difracción por más de un orden de magnitud.

El dispositivo abre múltiples oportunidades. En fecha reciente se ha propuesto una aplicación biomédica que hemos desarrollado en el marco de un proyecto apoyado por la Fundación CELLEX de Barcelona. Sabemos desde hace años que la luz puede ejercer fuerza sobre un cuerpo que flote en solución. Por tanto, puede utilizarse la luz para manipular un objeto; cuanto más concentrada esté la luz, más intensa será la fuerza ejercida sobre éste. Las pinzas ópticas se fundamentan en estos principios: mediante un objetivo de microscopio se focaliza luz láser, que se utiliza para atrapar y mover organismos vivos. Esta técnica permite manipular células (cuya magnitud es de una decena de micras), pero no organismos menores que una micra.

Hemos utilizado la nanofuente de luz a modo de nanopinza óptica para atrapar una bacteria viva. Se han inmovilizado de manera muy controlada, sin alterar sus funciones vitales, ejemplares de *Escherichia coli*. El dispositivo vendría a ser una suerte de camilla, a la cual se "ata" un microorganismo para estudiar su funcionamiento a escala nanométrica.

Romain Quidant
Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO)
Barcelona

Trilobites del Ordovícico ibérico

Gigantismo polar y comportamiento social hace 465 millones de años

Los trilobites eran artrópodos dotados de caparazón dorsal trilobulado. Vivieron en todos los mares paleozoicos durante más de 250 millones de años. Constituyen uno de los grupos fósiles característicos del Cámbrico al Devónico. Su caparazón poseía un tórax con un número variable de segmentos articulados, que les permitían arrollarse en posición defensiva (como las cochinillas de la humedad actuales).

La reapertura de una vieja cantera de pizarra en el norte de Portugal y su seguimiento científico a lo largo de diez años han permitido estudiar una ingente colección de trilobites recogidos durante la explotación. Se trata de uno de los principales yacimientos de estos fósiles.

Llama la atención el gigantismo observado en seis de las veinte especies de trilobites reconocidas en el yacimiento. Y notable es también la presencia esporádica de grupos de trilobites apiñados en áreas limitadas, distribuidas de forma aleatoria en ciertas capas del gran frente de explotación; en su concentración no intervinieron las corrientes marinas ni otros fenómenos físicos.

La espectacularidad del yacimiento reside sobre todo en los trilobites gigantes, con dimensiones medias en torno a los 40 centímetros, que alcanzan ocasionalmente 90 centímetros de longitud; para hacerse una idea más exacta, el promedio en los trilobites no excede los 10 centímetros. Constituyen un nuevo récord de tamaño para los fósiles del grupo, desbancando al récord anterior, un ejemplar canadiense de 72 centímetros.

Se conocían otros fósiles de trilobites gigantes en localidades ibéricas coetáneas, pero sólo en forma de fragmentos indeterminables. La aparición de ejemplares completos en el yacimiento portugués ha permitido identificar las especies. El fenómeno se halla relacionado con el gigantismo polar conocido en artrópodos más modernos dado que, durante el Ordovícico, los territorios ibéricos se situaban muy cerca del polo sur terrestre y formaban parte de la plataforma marina que rodeaba al continente de Gondwana.

Los grupos de trilobites solían ser monoespecíficos. Oscilaban entre seis y más de mil individuos; adoptaban un comportamiento gregario durante la fase de muda colectiva del caparazón o de cara a la cópula, con objeto de so-

1. Vista general de la cantera de pizarra en la localidad portuguesa de Arouca (Aveiro).

2. Trilobites gigante en el frente de explotación de la cantera.

▲ 3. Pigidio (región caudal) de un trilobites gigante del género *Hungioides*.

◄ 4. Grupo de ejemplares gigantes de la especie *Ogyginus forteyi*.

portar la presión de los depredadores en los momentos de mayor vulnerabilidad (comportamiento masivo parecido al del cangrejo cacerola de las Molucas actual). Otras veces, grupos de trilobites pequeños fosilizaban en el interior de galerías excavadas por otros organismos o incluso bajo carcasas abandonadas por trilobites gigantes, que los ocultaban y protegían en la fase de muda. Tal vez este comportamiento social fuera la clave del prolongado éxito evolutivo que tuvieron los trilobites en la era Paleozoica.

La importancia de la cantera portuguesa, situada en el Geoparque Arouca (Aveiro), reside en las condiciones excepcionales que concurrieron en la formación del yacimiento: los trilobites murieron asfixiados *in situ* como consecuencia de episodios repentinos de anoxia en el fondo marino, en una zona restringida y a salvo de corrientes. Así, los restos se conservaron en plena actividad: algunos de ellos mientras mudaban el caparazón y otros arrollados en posición defensiva durante la agonía.

Artur A. Sá
Universidad de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real (Portugal)

Juan Carlos Gutiérrez-Marco
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid

Inferencias imposibles

Una teoría matemática sobre los límites del conocimiento

Dentro del diluvio de conocimiento con que la ciencia nos inundó en el siglo xx, se encontraban límites infranqueables para lo que podemos conocer. Werner Heisenberg descubrió que mejorar la precisión con que se mide, por ejemplo, la posición de un objeto degrada inevitablemente el nivel de certeza con respecto a su momento. Kurt Gödel mostró que, dentro de cualquier sistema matemático formal lo suficientemente avanzado como para que resulte útil, es imposible utilizar el sistema para demostrar todas las afirmaciones ciertas que contiene. Y Alan Turing demostró que, en general, no se puede determinar si la ejecución de un algoritmo informático llegará a detenerse.

David H. Wolpert, científico de la computación, con formación de físico, del Centro de Investigación Ames de la NASA, se ha unido al grupo con su versión de un límite para el conocimiento. Debido a este límite, afirma, el universo está más allá de las posibilidades de comprensión de cualquier intelecto que exista dentro de ese universo, sin importar lo poderoso que sea. En particular, durante los dos últimos años, ha estado perfeccionando una prueba que demuestre que, cualesquiera que sean las leyes físicas de un universo, necesariamente existirán hechos sobre ese universo que sus habitantes no podrán aprender mediante experimentos ni predecir por medio de cálculos. Philippe M. Binder, físico de la Universidad de Hawai en Hilo, sugiere que la teoría implica que los investigadores que persiguen leyes unificadas no pueden aspirar más que a una "teoría de casi todo".

El trabajo de Wolpert persigue una descripción formal y rigurosa de procesos como la medición de una cantidad, la observación de un fenómeno, la predicción del estado futuro de un sistema o el recuerdo de información del pasado, una descripción que sea lo suficientemente general como para ser independiente de las leyes de la física. Observa que todos esos procesos comparten una estructura básica común: debe configurarse algo (ya sea un modelo experimental o un ordenador para realizar una simulación), debe especificarse una pregunta sobre el universo y debe proporcionarse una respuesta (correcta o incorrecta). Modela esta estructura general definiendo una clase de entidades matemáticas que denomina "dispositivos de inferencia".

Los dispositivos de inferencia actúan en una serie de universos posibles. Por ejemplo, nuestro universo, entendiendo por tal todo su camino en el espaciotiempo, podría ser un elemento de la serie de todos los universos permitidos por las mismas reglas que gobiernan el nuestro. No es necesario especificar nada sobre esas reglas en el análisis de Wolpert. Lo único que importa es que los diversos dispositivos de inferencia posibles proporcionen respuestas a preguntas en cada universo. Un dispositivo de inferencia podría estar relacionado con un conjunto de básculas digitales en universos similares al nuestro, donde alguien podría pesarse al mediodía de mañana y la pregunta podría referirse a su masa en ese momento. También las personas pueden ser dispositivos de inferencia o partes de uno de dichos dispositivos.

Perplejo: un teorema sobre los límites del conocimiento pone en un dilema al sapiente demonio de Laplace.

Wolpert demuestra que, en cualquiera de esos sistemas de universos, existen cantidades que no pueden averiguarse mediante ningún dispositivo de inferencia dentro del sistema. Así, fracasaría el "demonio" de la hipótesis de Pierre-Simon Laplace de principios del siglo xix (si damos al demonio de Laplace las posiciones y velocidades exactas de cada partícula del universo, podrá calcular el estado futuro del universo), si el diabillo en cuestión formara parte del universo.

Los investigadores ya habían demostrado la incomputabilidad de sistemas físicos específicos en el pasado. Wolpert señala, sin embargo, que sus resultados son mucho más generales, ya que prácticamente no hace ninguna suposición sobre las leyes físicas, ni requiere ningún límite del poder computacional del dispositivo de inferencia más allá de que deba existir dentro del universo en cuestión. Adicionalmente, los resultados no sólo se aplican a las predicciones relativas al estado futuro de un sistema físico, sino también a las observaciones de un estado presente y al examen de los registros de un estado pretérito.

La prueba del teorema, similar a los resultados del teorema de la incompletitud de Gödel y al problema de la detención de Turing, se basa en una variante de la paradoja del mentiroso: pedir al demonio de Laplace que prediga, con un simple sí o no, el siguiente hecho sobre el estado futuro del universo: "¿El universo no será uno en el que tu respuesta a esta pregunta será sí?" Para el demonio, buscar una respuesta verdadera de tipo sí/no es como intentar determinar la veracidad de "Esta afirmación es falsa". Conocer el estado exacto actual de la totalidad del universo, conocer todas las leyes que rigen el universo y tener un poder de computación infinito no ayudará al demonio a decidir correctamente cuál será su propia respuesta.

Pero la existencia de semejante paradoja no debe sorprendernos. Como señala Scott Aaronson, del Instituto de Tecnología de Massachusetts: "Que tus predicciones sobre el universo estén restringidas de forma fundamental por el hecho de que tú mismo formas parte del universo sobre el cual realizas las predicciones siempre me ha parecido bastante obvio y creo que Laplace diría lo mismo si pudiéramos preguntárselo". Aaronson reconoce, sin embargo, que "a menudo resulta útil, como ejercicio, identificar todas las suposiciones que hay detrás de una idea, volver a escribirlo todo con una notación formal y meditar detalladamente sobre las consecuencias", como ha hecho Wolpert.

Graham P. Collins

CONCEPTOS BASICOS

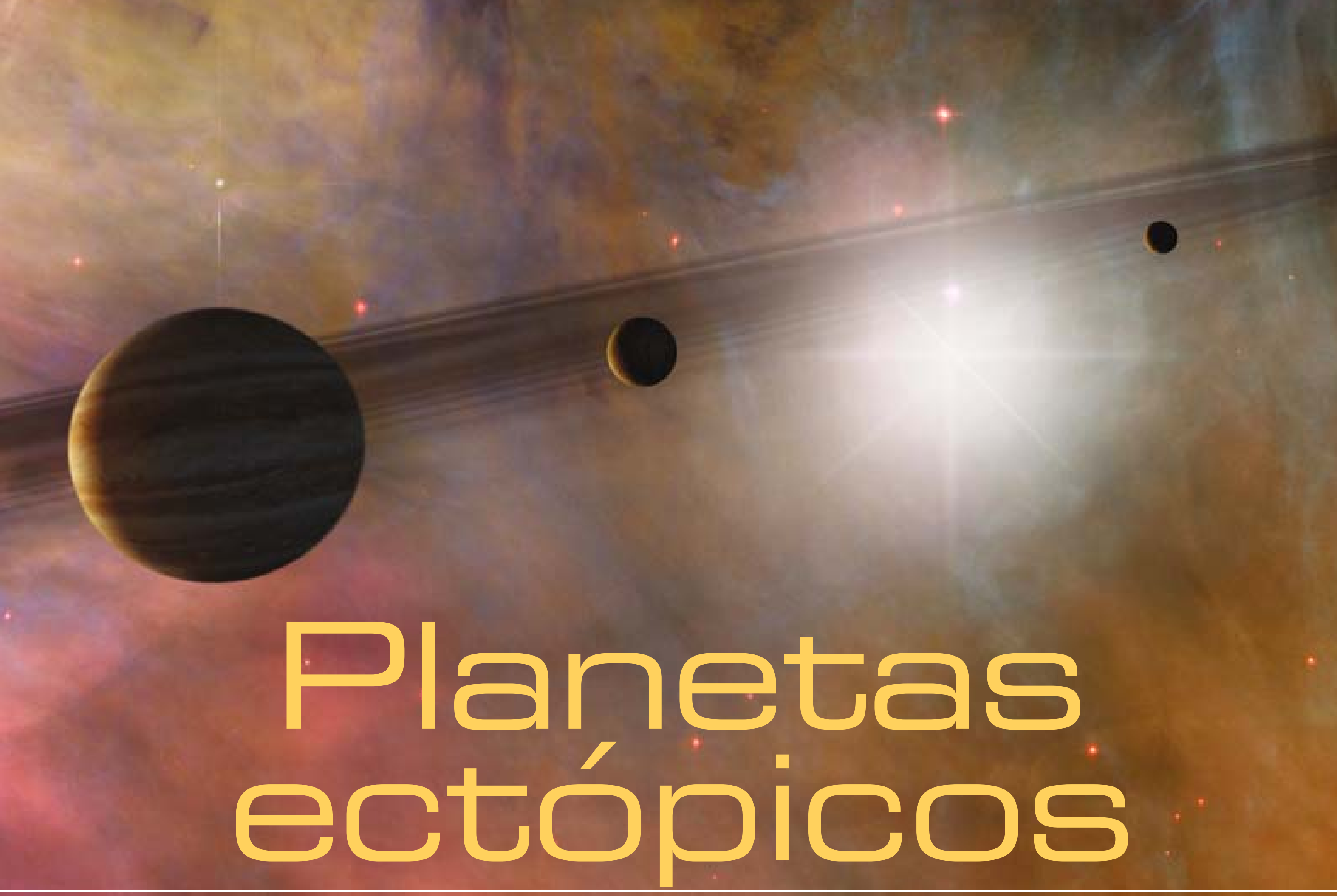
- Pocos astrónomos, o ninguno quizá, esperaban que hubiese una gran diversidad de planetas más allá del sistema solar. Los sistemas más extremos son los que orbitan en torno a estrellas de neutrones, enanas blancas y enanas marrones.
- Las estrellas de neutrones nacen en las explosiones supernova; los planetas que giran a su alrededor son probablemente escombros coagulados. Los cuerpos en torno a las enanas blancas sobrevivieron a la muerte de las estrellas de tipo solar. Las enanas marrones, cuya masa no es mucho mayor que la de los planetas, parecen albergar entornos adecuados para la formación de planetas.

Las enanas blancas ofrecen uno de los símbolos más conmovedores de los cielos. Aunque tienen una masa parecida a la del Sol, son muy débiles, y van siéndolo cada vez más (no se atienen a la relación entre masa y luminosidad de las estrellas comunes). Más que estrellas, constituyen cadáveres de estrellas. En otros tiempos se parecieron mucho al Sol y brillaban tanto como él. Al írseles agotando el combustible, se precipitaron en una tormentosa agonía. Su tamaño se centuplicó y su brillo se multiplicó por diez mil; pero al fin, perdidas sus capas exteriores, quedaron reducidas a rescoldos no mayores que la Tierra. Por el resto de la eternidad, permanecerán inertes; poco a poco se apagarán.

Por si ese cuadro no resultara sombrío, sabemos ya que es peor aún. Hemos encontrado una docena de enanas blancas en la galaxia rodeadas de asteroides, de cometas y quizá también de planetas: se trata de sistemas repletos de mundos hasta ahora desconocidos. Las estrellas, vivas aún, se encendían como soles cada día en los cielos de esos astros. Calentaban suavemente sus superficies y agitaban vientos. Quizás hubiese organismos que se empapaban de sus rayos. Pero al morir vaporizaron, o engulleron e incineraron, los planetas interiores; sólo subsistieron los cuerpos que residían en afueras más frías. Con el tiempo, destruyeron y consumieron muchos de esos supervivientes. Esos sistemas diezmados nos muestran el funesto destino de nuestro sistema solar, para cuando, dentro de cinco mil millones de años, se extinga el Sol.

Siempre se ha sospechado que podrían orbitar planetas en torno a otras estrellas. No obstante, imaginábamos que los sistemas planetarios extrasolares se parecerían al nuestro y se centrarían en una estrella similar al Sol. Tras la larga serie de descubrimientos que comenzó hace 15 años, es evidente que pueden diferir radicalmente del nuestro. El primer ejemplo fue el sistema alrededor de la estrella de tipo solar 51 Pegaso, que alberga un planeta de mayor masa que Júpiter en una órbita menor que la de Mercurio.

Con el aumento de la sensibilidad de los instrumentos se han hallado casos aún más peculiares. La estrella de tipo solar HD 40307 da cobijo a tres planetas con masas entre 4 y 10 veces la masa terrestre, y todos en órbitas



Planetas ectópicos

Los astrónomos encuentran planetas donde, en teoría, no deberían estar

Michael W. Werner y Michael A. Jura

de menos de la mitad del tamaño de la órbita de Mercurio. La estrella de tipo solar 55 Cangrejo A no tiene menos de cinco planetas, con masas desde 10 a 1000 masas terrestres y separaciones orbitales entre una décima de la órbita de Mercurio y la de Júpiter. La literatura de ficción se quedó corta imaginando sistemas planetarios.

Los sistemas planetarios de enanas blancas prueban que las estrellas no han de ser necesariamente de tipo solar. Los planetas, y los ladrillos de que están hechos los planetas, pueden orbitar en torno a cuerpos que no son mayores que los propios planetas. La variedad de tales sistemas remeda la de los sistemas de estrellas comunes. Cuesta explicar la ubicuidad de los sistemas planetarios, su robustez y la manifiesta universalidad de los procesos y mecanismos que los producen. Es posible que los sistemas estelares como el nuestro no sean los más habituales en el universo, ni para los planetas en sí, ni para la vida siquiera.

El fénix y sus cenizas

Se suele olvidar que el primer planeta extrasolar descubierto tiene una estrella que no es de tipo solar: la estrella de neutrones PSR 1257+12, un cadáver estelar de un tipo aún más extremo. Concentra una masa superior a la solar en el tamaño de un asteroide: apenas 20 kilómetros de diámetro. El suceso que creó ese monstruo, la explosión supernova de una estrella de 20 veces la masa del Sol, fue mucho más violento que la defunción de una estrella de tipo solar; resulta difícil pensar que los planetas puedan sobrevivirle. Es más, la estrella que explotó medía un radio superior a 1 UA (unidad astronómica, la distancia entre la Tierra y el Sol), mayor que las órbitas planetarias observadas allí actualmente. Por ambas razones, esos planetas deben de haber nacido de las cenizas de la explosión.

Aunque las supernovas expelen la mayor parte de sus escombros hacia el espacio interestelar, quedan unos pocos restos ligados por la gravedad, que caen de nuevo hacia el remanente estelar y forman un disco giratorio a su alrededor. Los discos son cunas de planetas. Se cree que el sistema solar se constituyó cuando una amorfa nube interestelar de gas y polvo colapsó bajo su propio peso. La conservación del momento angular —el giro de toda esa

1. LAS ENANAS MARRONES son estrellas tan pequeñas —algunas apenas tienen más masa que los mayores planetas—, que nunca llegan a encenderse. Los astrónomos no se preocuparon por buscar planetas alrededor de esas estrellas atrofiadas. Sin embargo, ahora se cuenta con datos que apuntan a la formación de sistemas minisolares en torno a las enanas marrones y otros objetos donde no se esperaría que los hubiese.

RON MILLER

Los autores

Michael W. Werner es investigador del proyecto Telescopio Espacial Spitzer de la NASA; se halla adscrito al Laboratorio de Propulsión a Chorro del mismo organismo. **Michael A. Jura** es profesor de astronomía de la Universidad de California en Los Angeles. Ha trabajado en la astrofísica de los entornos fríos y de baja densidad y en los sistemas planetarios extrasolares.

masa— hizo que parte del material no cayera sobre la estrella recién nacida, sino que se dispusiese en forma de torta. Dentro del disco, la coagulación del polvo y el gas creó los planetas [*véase* "La génesis de los planetas", por Douglas N. C. Lin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2008]. Este proceso pudo ocurrir también en los discos que suceden a las supernovas.

Se descubrió el sistema alrededor de PSR 1257+12, al medir las desviaciones periódicas de los tiempos en que la estrella emite sus impulsos de radio. Esas desviaciones se deben a que el ligero empuje que sufre la estrella por parte de los planetas causa alteraciones cíclicas en su posición y modifica la distancia que recorren los impulsos. A pesar de las intensas búsquedas en los impulsos de otras estrellas, no se tiene constancia de otros sistemas similares. El púlsar PSR B1620-26 contiene al menos un planeta, pero orbita tan lejos, que se cree que no se formó en el disco que sucedió a la supernova, sino que la gravedad lo ha arrebatado a otra estrella.

En el año 2006, sin embargo, el telescopio espacial Spitzer de la NASA descubrió una emisión infrarroja inesperada, procedente de la estrella de neutrones 4U 0142+61. La luz infrarroja puede originarse en la magnetosfera de la estrella o en un disco circunestelar. Esta estrella surgió de una explosión supernova de hace cien mil años y se necesita un millón de años para la formación de los planetas; por consiguiente, el sistema, en caso de que la radiación indique la presencia de un disco, podría parecerse algún día al que gira en torno a PSR 1257+12.

Muchas enanas blancas cuentan con discos, si bien diferentes: revelan la presencia real de cuerpos en órbita y no apuntan al mero potencial de su formación. Al igual que sucede con 4U 0142+61, la clave reside en la emisión inesperada de luz infrarroja. El primer indicio data de 1987, cuando uno de los observatorios terrestres de la NASA, el telescopio infrarrojo de Mauna Kea en Hawai, halló un exceso de luz infrarroja en la enana blanca G 29-38. El espectro de esa demasía es el que corresponde a un cuerpo de una temperatura de 1200 kelvin, mucho más frío que la superficie de la estrella, que se halla a unos 12.000 kelvin.

En un principio, se pensó que la enana blanca tenía por compañera una segunda estrella de menor temperatura. Pero en 1990 se demostró que la emisión infrarroja variaba al unísono con el propio brillo de la estrella; se trataba, pues, de luz reflejada o reprocesada. La explicación más verosímil es la de un disco circunestelar calentado por la estrella.

Esta estrella goza de otra propiedad peculiar. Sus capas exteriores contienen elementos pesados, como el calcio y el hierro, lo que resulta extraño, puesto que el campo gravitatorio cerca de la superficie de la enana blanca

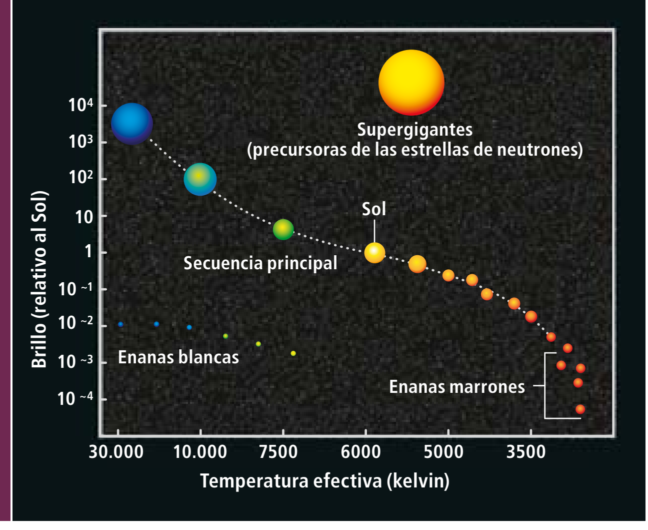
En la oscuridad

Los planetas se descubren de manera indirecta, a través de los efectos que provocan en la velocidad, posición y brillo de las estrellas anfitrionas. En la mayoría de los casos mencionados en el artículo, los astrónomos se han centrado en un tipo de prueba indirecta: la presencia de un disco de polvo alrededor de una estrella. Las estrellas recién formadas están rodeadas por un disco protoplanetario donde, según se piensa, nacen los planetas. A las estrellas maduras les rodea un disco de escombros. Se cree que lo crean las colisiones o evaporaciones de cometas y asteroides; sería un indicio de la presencia de planetas en el presente o en el pasado.

Cabe distinguir entre los dos tipos de discos basándonos en cómo absorben la luz estelar y la radian en longitudes de onda del infrarrojo (*derecha*). El telescopio espacial Spitzer de la NASA, lanzado en el año 2003, ha demostrado ser una auténtica máquina descubridora de discos. Sus cámaras infrarrojas de gran campo captan cientos de estrellas en una imagen y reconocen los que contienen disco, para su posterior estudio.

Spitzer es el sucesor de telescopios infrarrojos anteriores, como el Satélite Astronómico Infrarrojo (IRAS), del decenio de los ochenta, y el Observatorio Infrarrojo Espacial de la Agencia Espacial Europea (ISO) de mediados del decenio siguiente. Al contrario que IRAS, explorador de todo el cielo, Spitzer apunta a cuerpos celestes concretos con el fin de estudiarlos en profundidad. La vida media de su refrigerante de helio líquido, cinco años largos, sobrepasa con creces la de cualquier otra misión pasada. El telescopio Spitzer ha estudiado de todo, desde planetas extrasolares hasta galaxias del universo temprano.

El refrigerante se está agotando; el telescopio comenzará a calentarse desde un cero casi absoluto hasta los 30 kelvin. Incluso así, seguirá operando en las longitudes de onda cortas de la banda infrarroja hasta por lo menos mediados de 2011. El hueco que dejará Spitzer lo ocuparán el Observatorio Espacial Herschel, recientemente lanzado, y el Telescopio Espacial James Webb, cuyo lanzamiento está previsto para 2013.



2. LOS ALREDEDORES DE LAS ESTRELLAS COMUNES, las que, por su temperatura y brillo, se encuentran en la llamada secuencia principal, parecen los lugares donde más natural es buscar análogos de nuestro sistema solar. Pero también hay sistemas planetarios en torno a objetos que están fuera de la secuencia, como las enanas blancas y marrones.

MELISSA THOMAS

La luz infrarroja descubre los discos y, por tanto, los planetas o los ladrillos con que se forman

Un disco circunestelar de gas y polvo, como aquel donde nacieron los planetas de nuestro sistema solar, absorbe la luz estelar y emite radiación infrarroja. Lo que observamos es una composición de la luz estelar directa y de la emisión del disco.

Luz estelar

Disco circunestelar

Estrella

Luz del disco

Aunque el sistema esté demasiado lejos para ser resuelto por los telescopios, el espectro revela la luz mezclada.

Un ejemplo es la enana marrón OTS 44, cuyo espectro (*línea naranja*) parece caer en las longitudes de onda infrarrojas para después aplanarse, indicio de que la enana, cuyo espectro debería tener su máximo en longitudes de onda más cortas (*amarillo*), está rodeada de un material más frío cuyo espectro tiene el máximo en longitudes de onda más largas (*rojo*).

Enana marrón más disco
Enana marrón
Disco

Brillo (unidades arbitrarias)

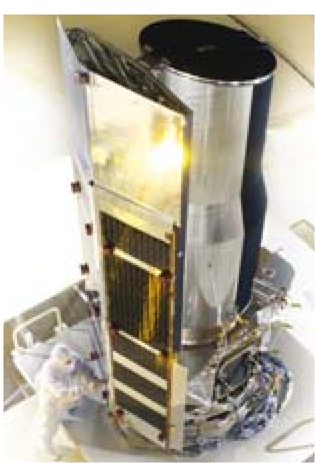
1
3
10
30

Longitud de onda (micras)

adquiere una intensidad tal, que los elementos pesados deberían hundirse en el interior. En el año 2003, uno de los autores (Jura) propuso una explicación simple tanto para el exceso infrarrojo como para la presencia de elementos pesados: la enana blanca había destruido recientemente un asteroide que se aventuró en su intenso campo gravitatorio. Una cascada de colisiones convirtió los escombros en un disco de polvo y éste fue poco a poco cayendo sobre la estrella.

Asteroides de postre

Las observaciones realizadas desde entonces han confirmado esa hipótesis. Con el telescopio espacial Spitzer y los telescopios de superficie, se han identificado unas 15 enanas blancas con excesos infrarrojos y anomalías químicas similares. Para el caso de G 29-38 y de otras siete estrellas, Spitzer ha ido aún más lejos y ha identificado la emisión infrarroja debida a los silicatos de los discos. Esos silicatos se



3. EL TELESCOPIO ESPACIAL SPITZER, mostrado aquí en fase de construcción, es el análogo infrarrojo del Telescopio Espacial Hubble.

RUSS UNDERWOOD *Lockheed Martin Space Systems (telescopio)*; MELISSA THOMAS *(ilustraciones)*

parecen a los de las partículas de polvo de nuestro sistema solar y son distintos de los encontrados en el espacio (*véase el recuadro* "Sistemas de enanas blancas").

Es más, aunque las capas exteriores de las estrellas contengan elementos pesados, no se presentan en las mismas cantidades. Son deficientes en elementos volátiles (carbono o sodio), en comparación con los elementos que tienden a permanecer en estado sólido (silicio, hierro y magnesio). Un tipo de composición que concuerda con el de los asteroides y los planetas rocosos del sistema solar. Y respalda la hipótesis controvertida que identifica los discos con asteroides pulverizados.

Los discos que ciñen a las enanas blancas son más pequeños que los discos de los que nacen los planetas en las estrellas jóvenes de tipo solar. A juzgar por el exceso infrarrojo, se extienden sólo hasta las 0,01 UA y presentan una masa tan pequeña como la de un asteroide de 30 kilómetros de diámetro, característica

compatible con un posible origen en la desintegración de ese tipo de cuerpos. No son lugares donde podrían nacer planetas, pero apuntan a que el material planetario sobrevive a la muerte de la estrella.

Los cálculos teóricos sugieren que los asteroides y los planetas del tipo de la Tierra escaparían a la destrucción si orbitaran a más de 1 UA. Cuando nuestro Sol muera, Marte debería sobrevivir; la Tierra, quizá sí, quizá no.

Para estudiar de qué modo sobrevivirían partes de un sistema planetario, el Spitzer observó hace dos años la enana blanca WD 2226-210. Esta enana es tan joven, que las capas exteriores de la estrella original de tipo solar todavía se perciben en la forma de nebulosa de la Hélice, una de las nebulosas planetarias más conocidas [*véase* "La muerte de las estrellas comunes", por Bruce Balick y Adam Frank; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 2004].

En consecuencia, WD 2226-210 representa el eslabón perdido entre las estrellas de tipo solar y enanas blancas más viejas, como G 29-38. Está rodeada por un disco de polvo a una distancia de 100 UA, casi la escala del sistema solar, mucho más lejos que los discos que hay alrededor de otras enanas blancas, distancia excesiva para que se componga de asteroides destruidos por la gravedad de la enana. Debe de estar hecho del polvo que resulta de los choques entre cometas y asteroides. Este tipo de discos de escombros existe en el Sol y en estrellas similares.

El descubrimiento de marras confirma que, cuando muere una estrella de tipo solar, sobreviven los asteroides lejanos y los cometas. Y si sobreviven asteroides y cometas, los planetas, más duraderos, deberían persistir. A medida que WD 2226-210 se enfríe, desprenderá menos luz que ilumine el polvo; el distante cinturón de asteroides y cometas se sumirá en la oscuridad. Pero en ocasiones algunos de sus miembros se aproximarán lo suficiente a la enana blanca para que los destroce.

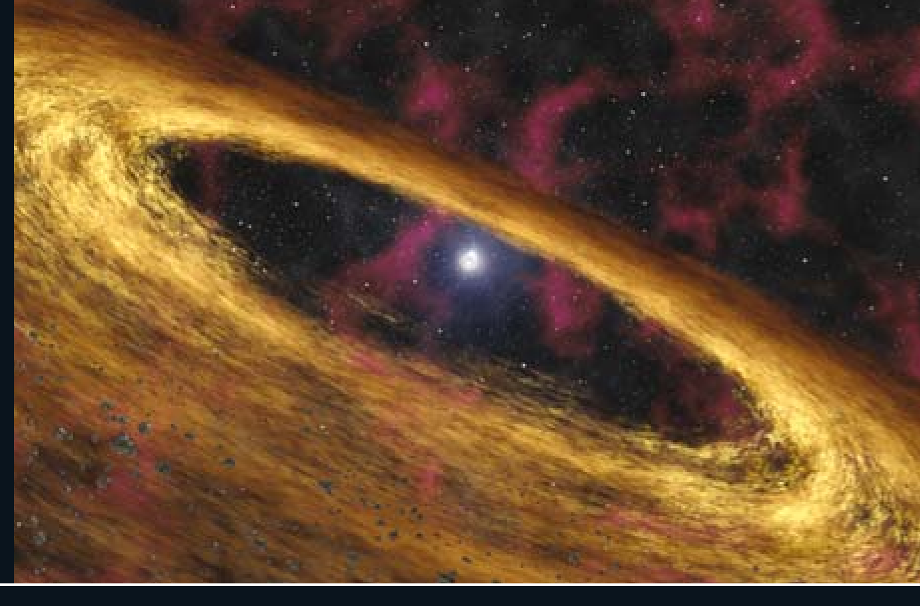
Estrellas atrofiadas

Una tercera clase de estrellas distintas del Sol y capaces de tener planetas es la enana marrón.

Sistemas de estrellas de neutrones

Las estrellas de neutrones son probablemente las anfitrionas más peculiares e inesperadas de sistemas planetarios. La estrella de neutrones 4U 0142+61, el remanente de una estrella que explotó como supernova hace 100.000 años, está envuelta en un disco de escombros estelares (*visión artística a la derecha*). Los escombros podrían haberse aglomerado para formar los ladrillos con que se hacen los planetas (*pedazos grises*).

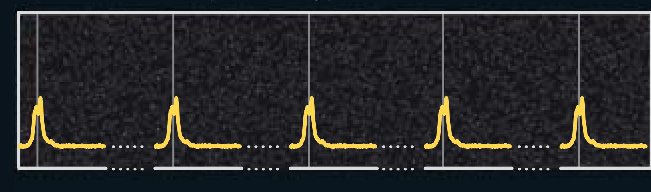
ESTRELLA DE NEUTRONES + DISCO
Nombre del sistema: 4U 0142+61
Edad del sistema: 100.000 años
Radio estelar: 10 kilómetros
Radio del disco: 1 unidad astronómica (UA)



Otra estrella de neutrones, PSR 1257+12, tiene verdaderos planetas. La llegada de los impulsos de emisión de radio oscila ligeramente en el tiempo (*derecha*), señal de la presencia de tres mundos circundantes (*debajo*).

ESTRELLA DE NEUTRONES + PLANETAS
Nombre del sistema: PSR 1257+12
Edad del sistema: 800 millones de años
Radio estelar: 10 km
Distancias orbitales de los planetas: 0,19, 0,36, 0,46 AU
Masas de los planetas: 0,02, 4,3, 3,9 masas terrestres

Espaciado constante de pulsos (no hay planetas)

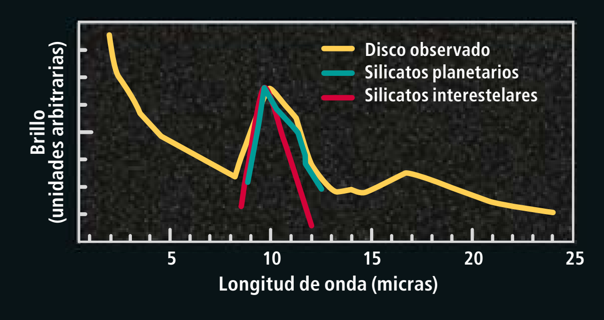


Espaciado variable de impulsos (hay planetas)

Epoca (año)

Sistemas de enanas blancas

Muchas enanas blancas están abrazadas por un pequeño disco de materia, posiblemente los restos de un asteroide (*representación artística a la derecha*). En algunos de estos discos se han observado los signos espectrales de los silicatos. El espectro encaja con el de los silicatos planetarios (*curva verde de la gráfica inferior*) —esencialmente piedra— en oposición a los silicatos interestelares (*curva roja*). Este y otros datos sugieren que los cuerpos en órbita, entre los que podría haber también planetas, sobrevivieron a la tumultuosa creación de la enana y todavía surcan los bordes invisibles del sistema.



ENANA BLANCA + DISCO DE ACRECIMIENTO
Nombre del sistema: G 29-38
Edad del sistema: 600 millones de años
Radio estelar: 10^4 km
Radio del disco: 0,001-0,01 UA

Una segunda clase de discos de escombros en torno a las enanas blancas se muestra aquí como un punto rojo en el centro de la imagen infrarroja de la nebulosa de la Hélice. Este disco es posiblemente el equivalente del cinturón de Kuiper en nuestro sistema solar. Podría haber discos de este tipo alrededor de las enanas blancas, pero permanecen indetectables porque las enanas son más viejas y por tanto iluminan menos.

ENANA BLANCA + DISCO DE ESCOMBROS
Nombre del sistema: WD 2226-210 (Nebulosa de la Hélice)
Edad del sistema: 10.000 años
Radio estelar: 10^4 años
Radio del disco: 100 UA

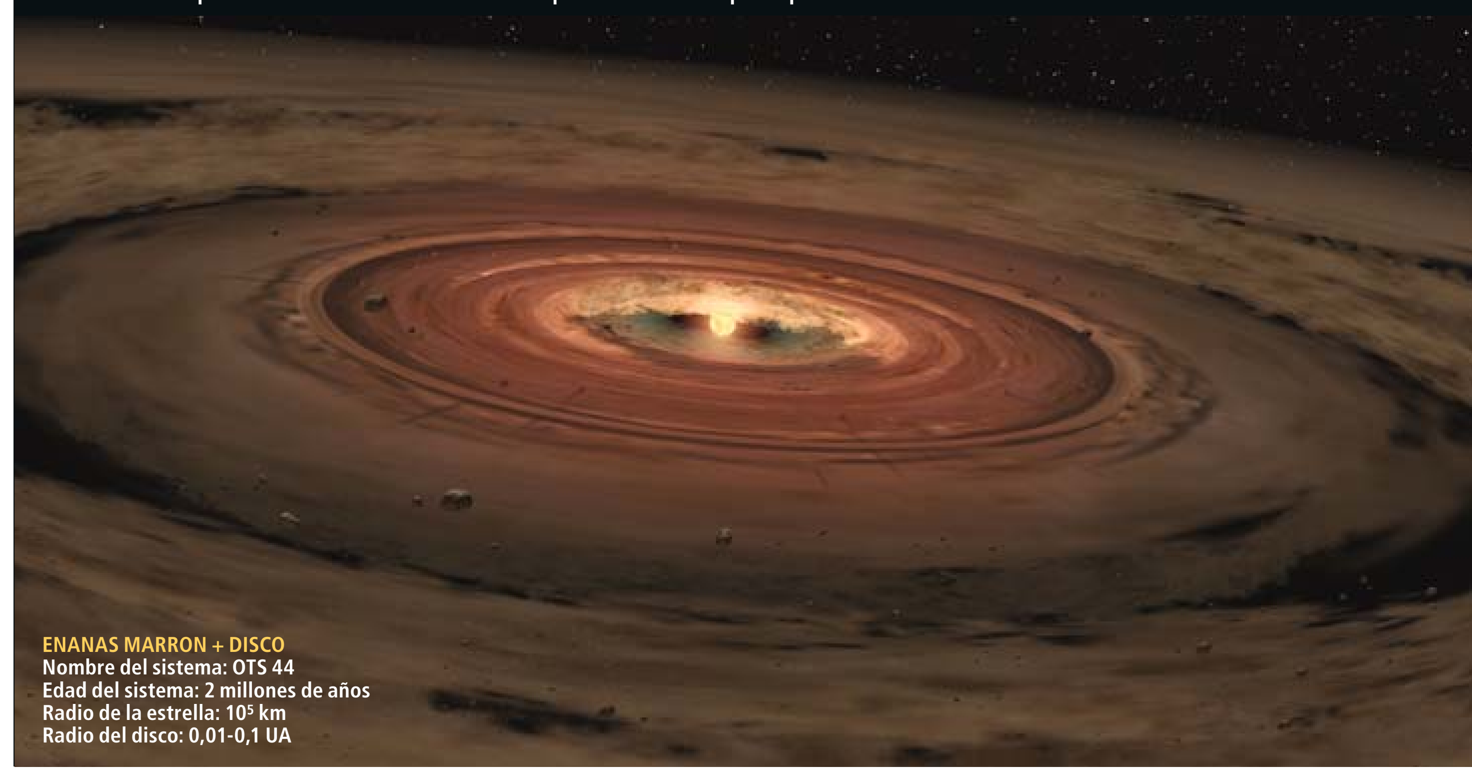
NASA/JPL-CALTECH/R. HURT *Spitzer Science Center (página izquierda)*; NASA/JPL-CALTECH/T. PYLE *Spitzer Science Center (arriba)*; NASA/JPL-CALTECH/K. SU *Universidad de Arizona (abajo)*; MELISSA THOMAS *(gráficas)*

Las enanas marrones son muy diferentes de las enanas blancas, a pesar de su denominación compartida. No son estrellas muertas, sino atrofiadas. Se forman de la misma manera que las estrellas, pero su crecimiento se detiene y no pasan de una masa inferior al 8 por ciento de la solar, el límite necesario para que el núcleo estelar adquiera suficiente temperatura y densidad para sostener una fusión nuclear de magnitud considerable. Sólo alcanzan a brillar con una débil luz infrarroja, que radia el calor acumulado durante su formación (y quizá pasen por un corto período temprano de fusiones nucleares). En los últimos 15 años, las exploraciones astronómicas han revelado la existencia de cientos de enanas marrones. Las de menor masa pesan poco más que los planetas gigantes.

Se ha visto que también estos objetos, incluso los más pequeños, pueden tener discos y, en consecuencia, quizá también planetas [*véase* "Origen de las enanas marrones", por Subhanjoy Mohanty y Ray Jayawardhana; Investigación y Ciencia, marzo 2006]. Esta posibilidad se ve apoyada por las observaciones que prueban que los discos de las enanas marrones experimentan una serie de cambios sistemáticos —entre ellas la disminución de la prominencia de la emisión infrarroja debida a silicatos— atribuibles a la coagulación de las partículas de polvo. Los mismos cambios también acontecen en los discos de las estrellas mayores, y señalan el crecimiento de los ladrillos de los sistemas planetarios. Los discos de las enanas marrones son demasiado exiguos comparados con planetas gigantes como Jú-

Sistemas con enanas marrones

Muchas enanas marrones poseen discos en los que podrían estar formándose los planetas. El disco en torno a OTS 44 tiene materia suficiente para crear Uranos o Neptunos. Este enana tiene unos dos millones de años; el Sol contaba con la misma edad cuando los planetas de nuestro sistema solar empezaron a tomar forma. Que los planetas puedan aparecer en entornos poco prometedores, como parecerían serlo los entornos de enanas marrones, enanas blancas y estrellas de neutrones, da a entender que la formación planetaria es mucho más tenaz de lo que se pensaba.



ENANAS MARRON + DISCO
Nombre del sistema: OTS 44
Edad del sistema: 2 millones de años
Radio de la estrella: 10^5 km
Radio del disco: 0,01-0,1 UA

piter, pero contienen material suficiente para formar un Urano o un Neptuno. Algunos astrónomos dicen haber encontrado planetas ya formados alrededor de las enanas marrones, pero no se ha confirmado aún definitivamente ningún descubrimiento así.

En resumen, los astrónomos han hallado planetas alrededor de al menos una estrella de neutrones, asteroides y cometas alrededor de más de una docena de enanas blancas, y un indicio de las primeras fases de la formación planetaria en torno a las enanas marrones. En última instancia, el estudio de estos y otros sistemas extrasolares tiene dos fines. Primero, se espera saber así más de nuestro sistema solar, en concreto de su evolución y estructura a gran escala, difíciles de discernir con una perspectiva espacial y temporal limitada. Esperamos, además, colocar al sistema solar en un contexto. ¿Es un sistema normal o especial? A pesar de la gran diversidad de los sistemas planetarios, ¿siguen todos una trayectoria común durante las etapas de su formación? La similitud entre la composición química de los asteroides del sistema solar y la del material que cae sobre las enanas blancas parece indicar que la respuesta es afirmativa.

El segundo objetivo es determinar hasta qué punto está extendida la vida en el universo. En nuestra vecindad galáctica, las enanas marrones son casi tan abundantes como las estrellas. ¿Pudiera ocurrir que la "estrella" más próxima al Sol sea una enana marrón? ¿Y que los planetas más cercanos a nuestro sistema solar orbiten alrededor de una enana marrón? El Explorador de Gran Campo para Cartografías Infrarrojas (WISE son las siglas en inglés), que la NASA espera lanzar a finales de este año, podría encontrar varias enanas marrones más cercanas que la estrella más próxima conocida. La formación de planetas terrestres en torno a las enanas marrones extiende no sólo el rango de hábitats potenciales, sino que, además, abre la interesante posibilidad de que la vida extraterrestre más cercana vea al despertar cada mañana una enana marrón.

De igual manera, la presencia de asteroides y cometas en torno a las enanas blancas ofrece la posibilidad no sólo de que los planetas sobrevivan a la muerte de estrellas como el Sol, sino de que la vida, si fuera capaz de adaptarse a las nuevas condiciones, resistiese en los entornos de esas estrellas muertas. Quizá las enanas blancas no sean tan sombrías.

NASA/JPL-CALTECH/T. PYLE *Spitzer Science Center*

Bibliografía complementaria

FIRST FRUITS OF THE SPITZER SPACE TELESCOPE: GALACTIC AND SOLAR SYSTEM STUDIES. M. Werner, G. Fazio, G. Rieke, T. L. Roellig y D. M. Watson en *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, vol. 44, págs. 269-321; 2006.

EXTERNALLY-POLLUTED WHITE DWARFS WITH DUST DISKS. M. Jura, J. Farihi y B. Zuckerman en *Astrophysical Journal*, vol. 663, n.º 2, págs. 1285-1290; 10 de julio, 2007.

THE CHEMICAL COMPOSITION OF AN EXTRASOLAR MINOR PLANET. B. Zuckerman, D. Koester, C. Melis, B. Hansen y M. Jura en *Astrophysical Journal*, vol. 671, n.º 1, págs. 872-877; 10 de diciembre, 2007.

La búsqueda de más Tierras

Se está a punto de descubrir otras Tierras, pero muy lejos todavía de saber si están habitadas

Donald Goldsmith

El 6 de marzo, el telescopio espacial Kepler de la NASA se embarcó en una misión de 4 años; se propone descubrir en la Vía Láctea planetas de tipo terrestre. Al igual que su predecesora, la misión francesa COROT, lanzada en diciembre de 2006, Kepler observará sin solución de continuidad una muestra seleccionada de estrella. Buscará en su luz caídas temporales del brillo. Una bajada de intensidad puede significar cualquier cosa. Quizá sea sólo un accidente pasajero en la energía de la estrella emergente; una segunda caída todavía tendría poco significado; una tercera que suceda transcurrido el mismo tiempo que entre la primera y la segunda llamará la atención; una cuarta caída tras el mismo intervalo implicará casi con certeza la existencia de un planeta en una órbita que lo sitúa directamente entre la estrella y nosotros. Cada vez que el planeta pasa —"transita"— por delante del disco de su estrella bloquea parte de la luz de ésta. Un mundo con el tamaño del nuestro reduce la luz de su estrella en alrededor de una parte en 10.000 [*véase* "Sombras de otras Tierras", por Laurance R. Doyle, Hans-Jörg Deeg y Timothy M. Brown; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre 2000].

A principios de este año, COROT encontró un planeta con un diámetro unas dos veces el terrestre en una órbita tan cercana a su estrella, que cada revolución requería sólo 20 horas. Kepler, con un espejo tres veces y medio mayor que el de COROT, debería encontrar docenas o cientos de Tierras con órbitas a una distancia de su sol más confortable. La mayoría de las búsquedas actuales, que examinan el ligero empuje gravitatorio que el planeta ejerce sobre su estrella, no pueden detectar mundos tan pequeños. La desventaja de Kepler es que las órbitas de los planetas deben estar alineadas con nuestra línea de visión, y las leyes de la probabilidad indican que sólo uno de cada cien disfrutará de tal suerte. No obstante, Kepler debería ser capaz de crear una muestra estadísticamente válida de análogos galácticos de la Tierra.

Ahora bien, supongamos que lo lograse. Los astrónomos continuarán privados de la información más apetecida: ¿cuáles son las condiciones existentes en estos planetas? ¿Son apropiados para la vida? Cuando un planeta de gas gigante transita ante su estrella, se analiza su atmósfera midiendo la cantidad de luz bloqueada a diferentes longitudes de onda. Pero los planetas del tamaño de la Tierra son demasiado pequeños para que la técnica funcione; por tanto, la estrategia de COROT y Kepler, aunque puede encontrar Tierras, no dirá mucho sobre ellas. No se halla capacitado para discernir ninguno de los signos de la vida, como los colores distintivos de la clorofila o sus equivalentes alienígenas [*véase* "El color de las plantas extraterrestres", por Nancy Y. Kiang; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio 2008]. La misma Misión Espacial Interferométrica (SIM), con un lanzamiento previsto para 2015, apenas podrá decir algo notable las Tierras que descubra.

Los instrumentos capaces de analizar la habitabilidad están aún lejos en el futuro. Por la poderosa razón de que son muy caros. El Buscador de Planetas Terrestres de la NASA y la misión Darwin de la Agencia Espacial Europea podrían tomar medidas espectroscópicas de las superficies y de las atmósferas de los planetas, pero ninguna de esas misiones ha superado la fase de estudio del diseño. Incluso reuniendo todos los recursos de las agencias, una misión así costaría unos dos mil millones de dólares y necesitaría diez años para su construcción. Por ahora, las mayores esperanzas de obtener más información acerca de los planetas las dan el Telescopio Espacial James Webb (JWST), cuyo lanzamiento está previsto para 2013, y la próxima generación de telescopios de superficie [*véase* "Los grandes telescopios del futuro", por Roberto Gilmozzi; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2006]. Aunque no fueron inicialmente diseñados para el análisis de los planetas, se trata de telescopios equipados con instrumentos coronográficos que bloquean la luz de las estrellas, lo que permite ver cualquier cuerpo pequeño oculto en el resplandor. Estos instrumentos proporcionarán imágenes de los jóvenes planetas gigantes de gas, si existen, alrededor de algunas de las estrellas más cercanas. Podrán, asimismo, reunir información espectroscópica de objetos con órbitas muy ceñidas a su sol.

SE PUEDE DESCUBRIR UN PLANETA, aunque sea demasiado pequeño para verlo directamente, cuando pasa ante su estrella y debilita su luz un poco.

Los próximos años resultarán emocionantes por lo que COROT y KEPLER descubran. Después entraremos en un período de frustración; sólo soñaremos con lo que todavía quedará por descubrir. No será una situación inusual: el conocimiento científico avanza escalonadamente. Los resultados positivos sugieren la necesidad de nuevos observatorios espaciales e impulsan su financiación. La búsqueda de planetas en entornos extremos, alrededor de estrellas de neutrones, de enanas blancas, de enanas marrones, nos dirá en qué circunstancias puede llegar a producirse la formación planetaria [*véase el artículo principal*]. Pero para saber cuál es el verdadero puesto de nuestro planeta en el cosmos, aún hay mucho por hacer.

Donald Goldsmith es autor de "400 años del telescopio" ("Interstellar Media Productions", 2009).

RON MILLER

La crisis del fósforo

Este recurso subestimado, componente fundamental de los abonos, durará todavía varios decenios. Pero si queremos evitar el desplome de la agricultura, debemos acometer de inmediato su conservación

David A. Vaccari

CONCEPTOS BASICOS

- La extracción de fósforo para la producción de abonos consume el mineral más deprisa de que los ciclos geológicos puedan reponerlo. Estados Unidos podría agotar en unos cuantos decenios sus reservas; otros países poseen depósitos abundantes que se agotarían más o menos en un siglo.
- El exceso de fósforo en vías fluviales alimenta las proliferaciones algales, que privan de oxígeno a los peces y crean "zonas muertas".
- Reducir la erosión del suelo y reciclar el fósforo contenido en los residuos animales facilitaría la producción sostenible de alimentos y prevendría las floraciones algales.

Por compleja que sea la química de la vida, sólo tres números condicionan el crecimiento próspero de las plantas: 19, 12 y 5. Corresponden a los porcentajes de nitrógeno, fósforo y potasio que vienen señalados en los paquetes de abono. Durante el siglo xx, estos tres nutrientes consiguieron elevar la productividad agrícola y sextuplicar la población mundial. ¿Cuál es su fuente?

El nitrógeno se obtiene de la atmósfera; el fósforo y el potasio se extraen de minas. Tenemos potasio para varios siglos, pero con el fósforo ya es otro cantar. Las reservas mundiales accesibles tal vez empiecen a agotarse a finales de este siglo. Ello coincidirá con una población que podría rebasar los límites sostenibles.

Pero los problemas podrían surgir mucho antes. Los vaivenes del precio del petróleo en 2008 demostraron que los mercados pueden contraerse mucho antes de que un determinado recurso se aproxime a su fin. Por otra parte, la distribución de las reservas de fósforo es aún más desigual que la del petróleo, lo que añade dificultades de suministro. Estados Unidos es el segundo productor de fósforo mundial (China es el primero), con un 19 por ciento del total, pero el 65 por ciento de su producción proviene de un solo lugar: los pozos mineros de Tampa, en el estado de Florida, que quizá no duren más de unos decenios.

Cerca del 40 por ciento de las reservas mundiales están controladas por un solo país, Marruecos, llamado "la Arabia Saudí del fósforo". Aunque Marruecos sea una nación estable y con buenas relaciones internacionales, este desequilibrio convierte el fósforo en una bomba de relojería geoestratégica.

Por añadidura, los abonos se cobran un peaje ambiental. Las prácticas agrícolas modernas empobrecen en fósforo la tierra a un ritmo tres veces superior al natural; asimismo, la afluencia excesiva de fósforo a canales de agua promueve la aparición de proliferaciones algales incontroladas y altera los ecosistemas acuáticos. Si bien no se le ha hecho mucho caso —si lo comparamos con lo realizado con el carbono o el nitrógeno—, el fósforo se ha convertido en uno de los factores que más cuentan en nuestro sostenimiento actual.

La revelación verde

Mi interés por el fósforo se despertó a mediados de los noventa, cuando participé en un programa de la NASA sobre el cultivo de alimentos en el espacio. El diseño del sistema de cultivo requería analizar el ciclo de todos los componentes de la comida, que habrían de reciclarse en el cerrado entorno de una nave espacial. Esa investigación podría resultar de gran utilidad para un futuro viaje a Marte, de casi tres años de duración.

Pero nuestro planeta también puede considerarse una nave espacial: la cantidad total de cada elemento es, en esencia, fija. En su ciclo natural, el fósforo pasa de las rocas al

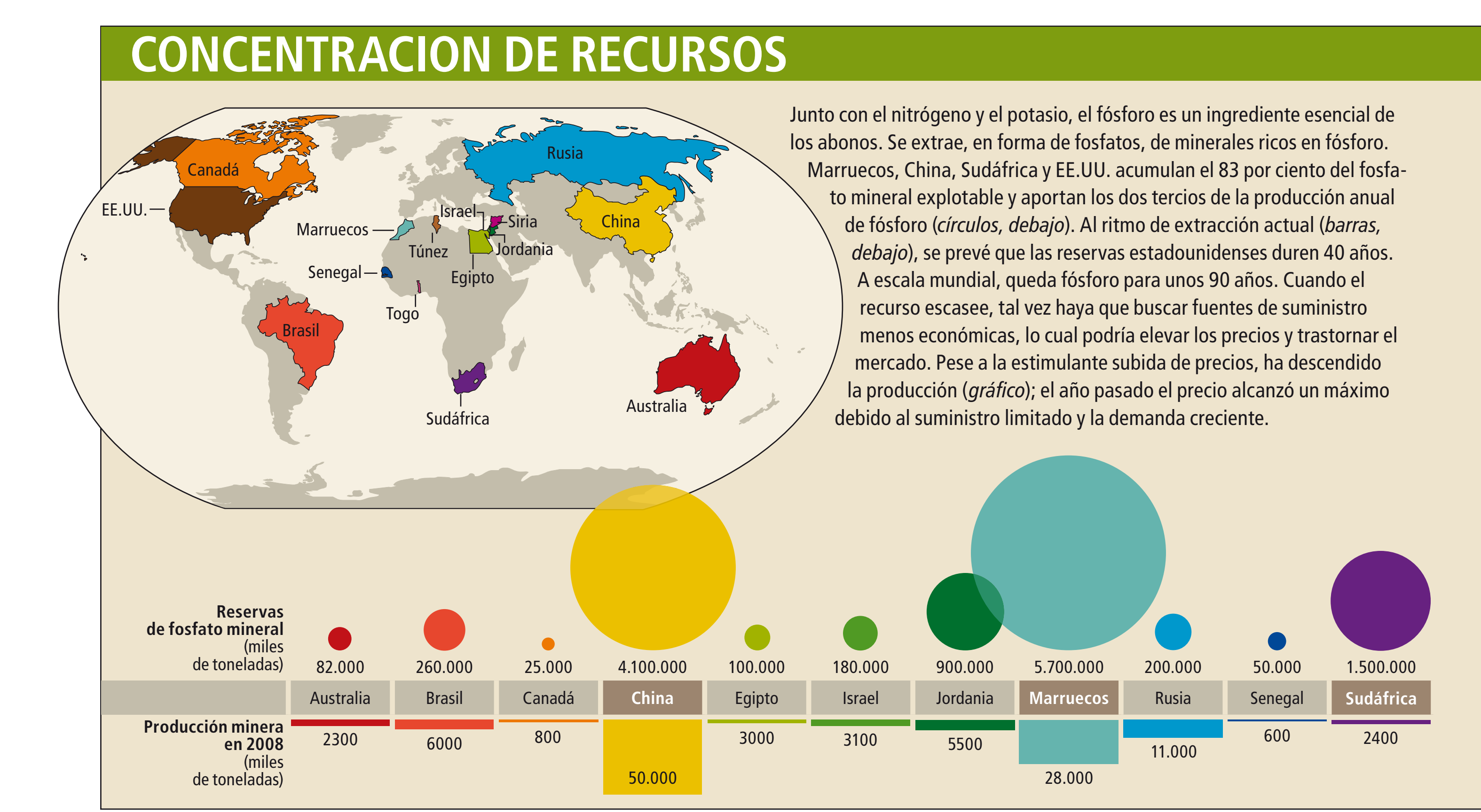
suelo, lo reciben las plantas y, a través de ellas, entra en la cadena trófica para llegar a los organismos. El fósforo, habitualmente en la forma de ión fosfato trivalente (PO_4^{3-}), resulta imprescindible para la vida. En torno a él se vertebran el ADN y las membranas celulares. Constituye el componente esencial del trifosfato de adenosina (ATP), principal almacén celular de energía. El cuerpo humano contiene unos 650 gramos de fósforo, la mayor parte en los huesos.

Los ecosistemas terrestres utilizan y reutilizan el fósforo en ciclos locales 46 veces por término medio. El mineral corre luego por escorrentías y vías de agua hacia el océano, donde los organismos marinos pueden reciclarlo unas 800 veces hasta que termina por sedimentarse. Millones de años después, es posible que un levantamiento tectónico lo devuelva a tierra firme.

La recolección de las cosechas rompe el ciclo natural al detraer fósforo de la tierra. En la agricultura primitiva, cuando los residuos humanos y animales servían de abono, los nutrientes regresaban al suelo a un ritmo parejo al de extracción. Pero nuestra sociedad moderna separa la producción y el consumo de alimentos, lo que limita nuestra capacidad de devolver los nutrientes a la tierra. Antes bien, los utilizamos una vez y luego los evacuamos.

La agricultura acelera la erosión del terreno (las labores de arado y cultivo trastornan y ponen al descubierto el suelo), de modo que las escorrentías arrastran mayor cantidad de fósforo. También el control del caudal de los ríos tiende a alterar el ciclo natural del fósforo. En condiciones normales, las crecidas redistribuirían sedimentos ricos en fósforo hacia tierras bajas, donde volverían a estar a disposición de los ecosistemas; sin embargo, los sedimentos quedan retenidos en presas o

JEN CHRISTIANSEN



confinados por diques en los ríos hasta que llegan al mar.

Un exceso de fósforo, procedente de la erosión del suelo y de los residuos humanos y animales, acaba, pues, en lagos y océanos. Allí hace brotar enormes e incontroladas floraciones de cianobacterias (algas azul verdosas) y algas; en cuanto mueren y caen al fondo, su degradación agota otros organismos que consumen oxígeno. Se crean así "zonas muertas" que contribuyen a empobrecer los bancos de pesca.

Mientras duren los suministros

La producción total de fósforo se estima hoy en unos 37 millones de toneladas métricas por año. Una gran parte, 22 millones de toneladas, se obtiene de las minas de fosfatos. La Tierra contiene multitud de minerales ricos en fósforo (económicamente recuperables), pero en su mayoría de difícil extracción. El Programa Internacional de Correlación Geológica (PICG) señalaba en 1987 que podría haber en el mundo 163.000 millones de toneladas de fosfato mineral, que cubrirían hasta casi mil años. Estas estimaciones, sin embargo, incluyen tipos de rocas como los minerales ricos en carbonatos, que no resultan practicables por falta de métodos de extracción de fósforo económicos. También se cuentan ahí los depósitos que resultan inaccesibles por su profundidad o situación en alta mar; además, puede que algunos se hallen en zonas subdesarrolladas o de interés ecológico, o en presencia de niveles elevados de contaminantes tóxicos o radiactivos (cadmio, cromo, arsénico, plomo y uranio).

Los reservas (depósitos económicamente recuperables con las técnicas usuales) se estiman en 15.000 millones de toneladas; al ritmo de consumo actual, podrían durar unos 90 años más. No obstante, es probable que aumente el consumo conforme crezca la población y los habitantes de los países en vías de desarrollo reclamen un nivel de vida más alto. Puede que el mayor consumo de carne requiera un aumento del rendimiento del agro, dado que los animales ingieren más alimentos que los alimentos en que se transforman.

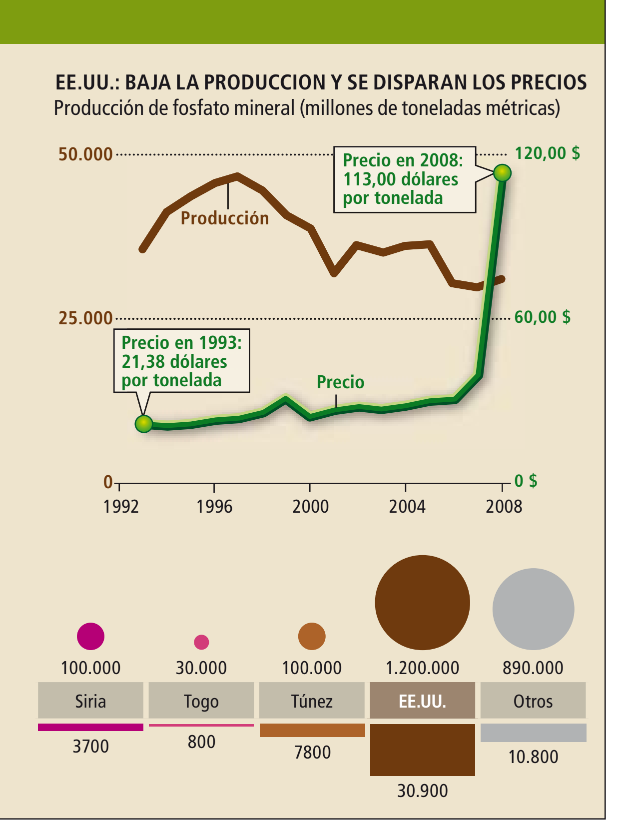
Las reservas de fósforo se concentran en cuatro países: EE.UU., China, Sudáfrica y Marruecos, con su anexión del Sahara Occidental. Acumulan el 83 por ciento de las reservas mundiales y suministran los dos tercios de la producción anual.

El grueso de la producción estadounidense de fosfatos procede de las minas del Valle de los Huesos en Florida, yacimiento fósil formado en el océano Atlántico hace 12 millones de años. Según el Servicio Geológico de EE.UU., las reservas nacionales ascienden a 1200 millones de toneladas; deberían bastar para 40 años, si se mantuviera el ritmo de producción, cercano a 30 millones de toneladas de fosfato mineral por año.

JEN CHRISTIANSEN (*mapa y gráficas*); FUENTE: U.S. GEOLOGICAL SURVEY, MINERAL COMMODITY SUMMARIES, ENERO DE 2009

El autor

David A. Vaccari es profesor y director del departamento de ingeniería civil, ambiental y marítima en el Instituto de Tecnología Stevens. Experto en tratamientos biológicos de aguas residuales y en la modelización de los efectos de la contaminación en ríos y torrentes, ha participado también en el desarrollo de sistemas de reciclaje para misiones tripuladas de la NASA a Marte. Es coautor del libro *Environmental Biology for Engineers and Scientists*.



Pero las minas estadounidenses ya no dan fósforo suficiente para satisfacer la producción nacional de abonos, en su mayoría para exportación. Por eso el país importa fosfato mineral. China posee reservas de alta calidad, pero no exporta; EE.UU. obtiene de Marruecos la mayor parte de sus importaciones. Aún más que en el caso del petróleo, EE.UU. y gran parte del mundo tal vez llegue a depender de un solo país para conseguir un recurso esencial.

Algunos geólogos se muestran escépticos ante este panorama de crisis; consideran inestables las estimaciones de los recursos y de su duración. La definición misma de las reservas es dinámica: conforme aumentan los precios, se reclasifican como reservas depósitos a los que antes se creía demasiado costoso acceder. Asimismo, la escasez de suministro o la oscilación de los precios avivan los esfuerzos conservacionistas y el desarrollo de nuevas técnicas de extracción.

Las compañías mineras emprenden exploraciones sólo cuando el ciclo biológico de un recurso cae por debajo de unos cuantos decenios. Pero el agotamiento de las viejas minas incita a explorar más, lo que aumenta los recursos disponibles. El geólogo R. P. Sheldon señaló hace 20 años que el ritmo de descubrimiento de nuevos recursos se había mantenido a lo largo del siglo xx. Además, sugirió que no se habían explorado adecuadamente las regiones tropicales de suelos profundos; ocupan el 22 por ciento de las tierras del planeta, pero no contienen más que el 2 por ciento de las reservas de fósforo conocidas.

La mayoría de los descubrimientos de fósforo se han producido sólo en dos lugares: el Sahara Occidental, hoy anexionado a Marruecos, y Carolina del Norte; muchos de los recursos de Carolina del Norte están limitados por yacer bajo zonas de interés ecológico. No bastan, pues, los hallazgos actuales para disipar

Activos tóxicos

La escorrentía de los abonos y la descarga de aguas residuales contribuyen a la eutrofización, con proliferaciones incontroladas de cianobacterias en lagos y océanos, a menudo tan extensas, que se avistan desde el espacio. Las cianobacterias (o algas azul verdosas) se nutren del nitrógeno y el fósforo de los abonos. Una vez muertas, su descomposición empobrece de oxígeno el agua y extermina lentamente la vida acuática, creando "zonas muertas". La más extensa en EE.UU. cubría una superficie de más de 20.000 kilómetros cuadrados en julio de 2008, allende del delta del Mississippi; se observa el limo procedente del río en una imagen obtenida por satélite en 2001 (*derecha*). En el mundo hay más de 400 zonas muertas; entre todas abarcan una extensión superior a 245.000 kilómetros cuadrados. ¿Sobre qué elemento, fósforo o nitrógeno, debería centrarse un tratamiento del agua que impidiera la eutrofización? No está claro. Si desciende la concentración hídrica de nitrógeno, las cianobacterias de agua dulce recurren al nitrógeno atmosférico; por tanto, resulta más eficaz limitar las escorrentías de fósforo. Así lo confirmó en 2008 un estudio en el que se añadieron a un lago canadiense abonos durante 37 años (aporte anual constante de fósforo y aporte decreciente de nitrógeno). David Schindler, de la Universidad de Alberta en Edmonton, coautor del estudio, afirma que en ningún caso se ha demostrado que se reduzca la eutrofización mediante el control exclusivo del nitrógeno. En las aguas oceánicas, en cambio, parece que sucede lo contrario: las cianobacterias no absorben nitrógeno de la atmósfera y sí obtienen fósforo de los sedimentos, lo que exigiría controlar también el nitrógeno.

—Davide Castelvecchi

IMAGEN CORTESIA DE LIAM GUMLEY *Centro de Ingeniería y Ciencia Espaciales,* UNIVERSIDAD DE WISCONSIN–MADISON Y EL EQUIPO CIENTIFICO DEL ESPECTRORRADIOMETRO MODIS

Restaurar el equilibrio en el ciclo del fósforo

En la naturaleza, el fósforo atraviesa ciclos de cambio climático, procesos biológicos, sedimentación y levantamientos geológicos (*flechas verdes*). El voraz apetito de abonos de la agricultura moderna ha triplicado el consumo mundial de fósforo (*flechas naranjas*), pero una combinación de estrategias ecológicas (*recuadros*) mitigaría el problema.

DESTERRAR EL PLOMO
Las tuberías antiguas lixivian plomo y otros metales tóxicos, lo que hace peligroso el uso de residuos urbanos líquidos y sólidos a modo de abonos. La paulatina eliminación de esos metales facilitaría el reciclado de los desechos y de su contenido en fósforo.

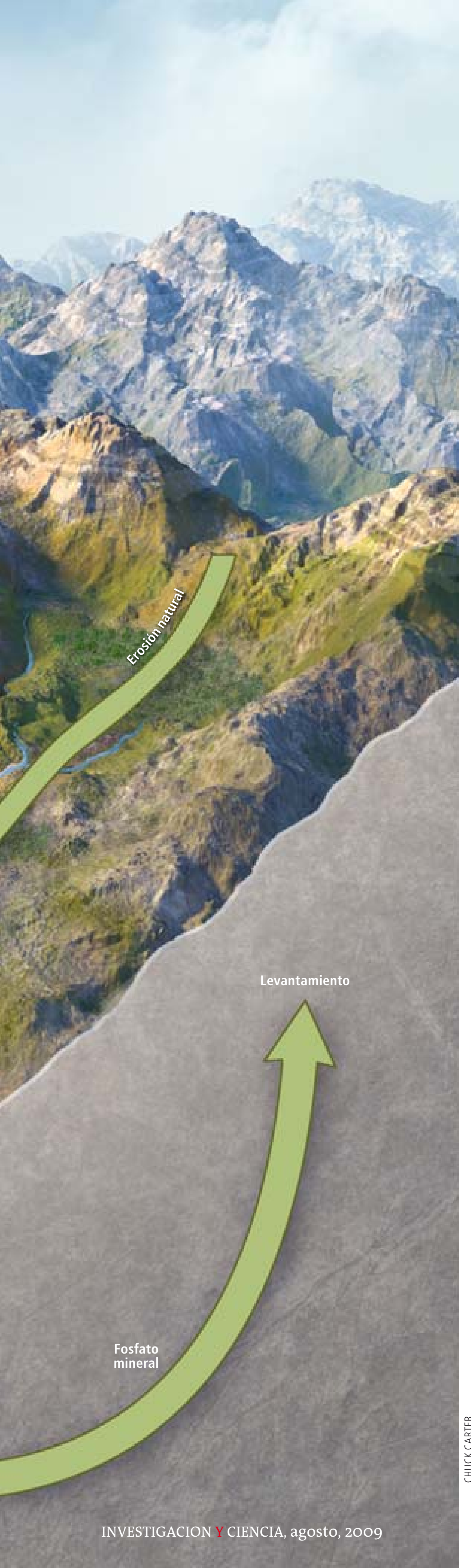
RECICLAJE DE RESIDUOS
El fósforo de nuestra dieta pasa por instalaciones de tratamiento de residuos y suele acabar en vertederos o corrientes de agua. El reciclaje de los residuos urbanos devolvería a la tierra fósforo y nitrógeno, otro componente esencial de los abonos.

BUSQUEDA DE NUEVAS FUENTES
Al escasear el fósforo, las subidas de precios incitarán a las compañías mineras a buscar nuevos yacimientos y a desarrollar nuevos métodos de extracción del mineral.

EXPLOTACION INTEGRADA
Los residuos animales (incluidos los huesos, ricos en fósforo) y las partes no comestibles de las plantas podrían reciclarse, con lo que volverían a ser la fuente principal de abonos.

REDUCIR LA EROSION
Las prácticas poco agresivas como la agricultura sin labranza reducen la erosión del suelo, dejando más fósforo disponible para la cosecha siguiente. La investigación permitiría, además, mejorar la eficiencia de los abonos.

Minería
Abonos
Erosión del suelo
Depósito de sedimentos
Cultivos
Alimento
Evacuación de residuos
Vertedero
Ganadería
Escorrentía
Residuos
Plantas
Animales
Fosfatos disueltos
Animales
Sedimentos marinos
Plantas



CHUCK CARTER

la preocupación por el abastecimiento en el futuro. La sociedad debe, pues, afrontar una previsible crisis del fósforo y comenzar a tomar medidas para su conservación.

Roca firme

Las estrategias de conservación habituales se aplican también al fósforo: reducir, reciclar y reutilizar. Podemos reducir el uso de abonos mediante prácticas agrícolas más eficientes, como el cultivo en terrazas o sin labranza para evitar la erosión [*véase* "Agricultura sin labranza", por David R. Huggins y John P. Reganold; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2008]. La biomasa no comestible (raíces y tallos) que se recoge con la cosecha debería devolverse al suelo con todo el fósforo que contiene; igualmente los residuos animales (huesos incluidos) de la producción de carnes y lácteos, de los que hoy se aprovecha sólo la mitad en forma de abono.

También tendremos que procesar las aguas fecales para recuperar el fósforo de los residuos sólidos. Es una labor difícil, pues los residuos orgánicos sólidos están contaminados con numerosas sustancias, sobre todo metales pesados como plomo y cadmio, lixiviados de tuberías viejas. El primer paso hacia una agricultura sostenible a largo plazo consiste en esforzarse por desterrar de nuestras instalaciones sanitarias los metales tóxicos.

La mitad del fósforo que eliminamos se halla en la orina; recuperarlo de ahí sería bastante sencillo. Aún mejor sería separar el residuo humano líquido del sólido, ya sea en plantas de tratamiento o en origen, mediante retretes especializados. La orina también es rica en nitrógeno; reciclarla compensaría parte del nitrógeno que en la actualidad se extrae, a un elevado coste energético, de la atmósfera.

Mientras tanto, es probable que los nuevos descubrimientos no hagan sino aplazar el agotamiento de las reservas, mas no impedirlo. Para que la agricultura fuese sostenible, el aplazamiento debería ser indefinido, hazaña sólo posible con una población mundial suficientemente reducida para ser alimentada mediante minerales naturales, en su mayor parte inalterados, que son fuentes pobres de fósforo. Como sucede con otros recursos, la pregunta final es cuántos habitantes puede aguantar el planeta Tierra.

Marchamos hacia el agotamiento de los yacimientos de fósforo de explotación sencilla y económica. Es posible que los optimistas acierten sobre el descubrimiento de nuevas fuentes y prevenir la escasez. Pero, ante lo que nos jugamos, no deberíamos dejar nuestro futuro en manos de la improvisación.

ECOLOGIA DEL FOSFORO

Un adulto necesita alrededor de un gramo de fósforo al día. Para mantener una dieta individual equilibrada, la agricultura moderna requiere la extracción anual de 22,5 kilogramos de fosfato mineral.

La erosión arrastra al menos tanto fósforo como el que se consume en forma de alimentos. En la cuenca del río Illinois se erosionan cerca de 1,2 kilogramos de suelo por cada kilogramo de maíz producido.

Hace 40 millones de años, un crecimiento vegetal explosivo estimulado por el fósforo capturó dióxido de carbono atmosférico en cantidad suficiente para provocar un período de enfriamiento global. El aporte extra de fósforo provino del levantamiento de la planicie Himalayo-Tibetana.

Bibliografía complementaria

PHOSPHORUS IN THE ENVIRONMENT: NATURAL FLOWS AND HUMAN INTERFERENCES. Vaclav Smil en *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 25, págs. 53-88; noviembre, 2000.

EUTROPHICATION OF LAKES CANNOT BE CONTROLLED BY REDUCING NITROGEN INPUT: RESULTS OF A 37-YEAR WHOLE-ECOSYSTEM EXPERIMENT. David W. Schindler et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 105, n.º 32, págs. 11.254-11.258; 12 de agosto, 2008.

MUTACIONES SILENCIOSAS

Se producen cambios sutiles en las secuencias de ADN, antaño reputados irrelevantes para la codificación proteínica, que adquieren importancia determinante en la enfermedad y en la evolución

J. V. Chamary y Laurence D. Hurst

CONCEPTOS BASICOS

- Durante mucho tiempo se ha dado por sentado que las mutaciones del ADN que no alteraban la proteína codificada por el gen eran "silenciosas".
- Misteriosas excepciones a esta regla, en las que los cambios silenciosos parecen ejercer un efecto determinante sobre las proteínas, han puesto de manifiesto que estas mutaciones supuestamente inocuas afectan a la salud a través de diversos mecanismos.
- Comprender la sutil dinámica y evolución de los genes puede descubrir nuevos aspectos relacionados con la etiología y la terapia de enfermedades.

Durante largo tiempo, los biólogos han creído comprender el modo en que las mutaciones genéticas provocaban enfermedades. Pero la investigación acaba de dar un brusco giro a la situación: ha revelado la existencia de mecanismos sorprendentes, que violan la intuición, mediante los cuales las alteraciones del ADN pueden hacernos enfermar. La noción clásica admitía que las mutaciones "silenciosas" eran irrelevantes para la salud, porque ese tipo de cambios en la secuencia de ADN no alteraba la composición de las proteínas codificadas por los genes. Las proteínas intervienen en los procesos que tienen lugar en las células, desde la catálisis de reacciones bioquímicas hasta el reconocimiento de invasores foráneos. Si el aspecto final de una proteína, se razonaba, termina siendo el correcto, cualquier pequeño fallo en su proceso de fabricación resultará inocuo para el organismo.

Sin embargo, los estudios etiológicos conducían en ocasiones hacia una mutación silenciosa, pese a que los investigadores partían de la base de que no podía ser la culpable. A otros resultados igualmente misteriosos se arribó en el curso de la investigación sobre la evolución del genoma: las pautas de cambio observadas en el ADN de varias especies indicaban que persistían, a lo largo del tiempo, numerosas mutaciones silenciosas, prueba de su utilidad para el organismo portador. En múltiples especies, esos cambios facilitaban una síntesis eficaz de proteínas. No así en el hombre.

Se están empezando a desentrañar los efectos de las mutaciones silenciosas sobre la salud y la enfermedad humanas. Los descubrimientos abren nuevas vías para el diseño de genes útiles para la terapia y la ingeniería genéticas.

Sinónimos y distintos

Si analizamos el mecanismo por el que las células fabrican las proteínas, entenderemos por qué una mutación génica no comporta efectos sobre una proteína. La fórmula básica es sencilla: una cadena de nucleótidos de ADN da lugar a una secuencia prácticamente idéntica de nucleótidos de ARN que, a su vez, se traduce en una cadena de aminoácidos que se pliega sobre sí misma para formar una proteína. Las letras del alfabeto de los

JON KRAUSE

1. EL SINDROME DE MARFAN causa alargamientos en ciertas partes del organismo. Quienes lo sufren portan dos mutaciones silenciosas que alteran el corte y empalme del ARN en las células.

SILENCIO ROTO

Se ha demostrado que alrededor de 50 enfermedades son causadas total o parcialmente por mutaciones silenciosas. En esta selección, las mutaciones dan como resultado una edición alterada del ARN que afecta a la síntesis de proteínas.

Síndrome de insensibilidad androgénica

Ataxia telangiectasia

Enfermedad por almacenamiento de ésteres de colesterol

Enfermedad granulomatosa crónica

Poliposis adenomatosa familiar

Cáncer colorrectal hereditario no polipósico

Enfermedad de Hirschprung

Síndrome de Marfan

Enfermedad de McArdle

Fenilcetonuria

Síndrome de Seckel

Hidrocefalia ligada al cromosoma X

ácidos nucleicos difieren en razón de sus bases químicas: adenina (A), citosina (C), guanina (G) y timina (T) en el ADN; en el ARN, el uracilo (U) sustituye a la timina.

Dicho de otro modo, las instrucciones codificadas en los ácidos nucleicos deben trasladarse al lenguaje de los aminoácidos para que pueda expresarse su "mensaje" (una proteína funcional). Cuando un gen "se expresa" de esa forma, las hebras de la doble hélice del ADN se separan y la maquinaria celular transcribe en una copia de ARN la secuencia de nucleótidos de una de las hebras sencillas. A continuación, el transcrito de ARN mensajero (ARNm) debe modificarse para convertirse en una versión más breve, antes de traducirse en una proteína por medio de los ribosomas y unos ARN de menor tamaño, los ARN de transferencia (ARNt).

A medida que los ribosomas recorren el ARNm, van llegando los ARNt para suministrar los aminoácidos codificados. Cada ARNt lleva consigo un aminoácido específico; la mayoría de ellos reconocen una secuencia concreta de tres nucleótidos de la hebra de ARNm. Cuando un ARNt encuentra en el ARNm la secuencia correspondiente, el ribosoma añade a la creciente cadena aminoacídica el aminoácido que transporta el ARNt.

Por tanto, el código que utilizan las células para traducir el lenguaje del ADN y el ARN al de las proteínas (el código genético) corresponde al conjunto de reglas que establecen qué aminoácido transporta cada ARNt. Este código tiene una característica fundamental: es redundante. Todos los genes y sus ARNm están organizados en "palabras" de tres letras, los codones.

A partir del alfabeto formado por los cuatro nucleótidos se pueden construir sesenta y cuatro codones de tres letras. Tres de ellos constituyen una señal de paro en la traducción del ARN; ello deja aún 61 codones posibles para especificar un alfabeto proteínico que consta de 20 aminoácidos, de modo que casi todos los aminoácidos están especificados por más de un codón. Por ejemplo, todos los codones que empiezan por GG (GGA, GGC, GGG, GGU) se traducen en el aminoácido glicina, lo que convierte a esos codones en sinónimos.

Por tanto, los cambios en una sola letra del ADN (mutación puntual) pueden cambiar un codón por otro que especifica un aminoácido incorrecto (mutación con sentido equivocado) o por una señal de paro (mutación sin sentido); ambos casos resultan en una proteína truncada. Cuando el cambio de una base altera un codón de paro para hacer que codifique un aminoácido (mutación con sentido), se obtiene una proteína más larga. Por último, cabe otro tipo de cambio en el que una mutación altera un nucleótido para generar un codón sinónimo; ésta sería una mutación "silenciosa".

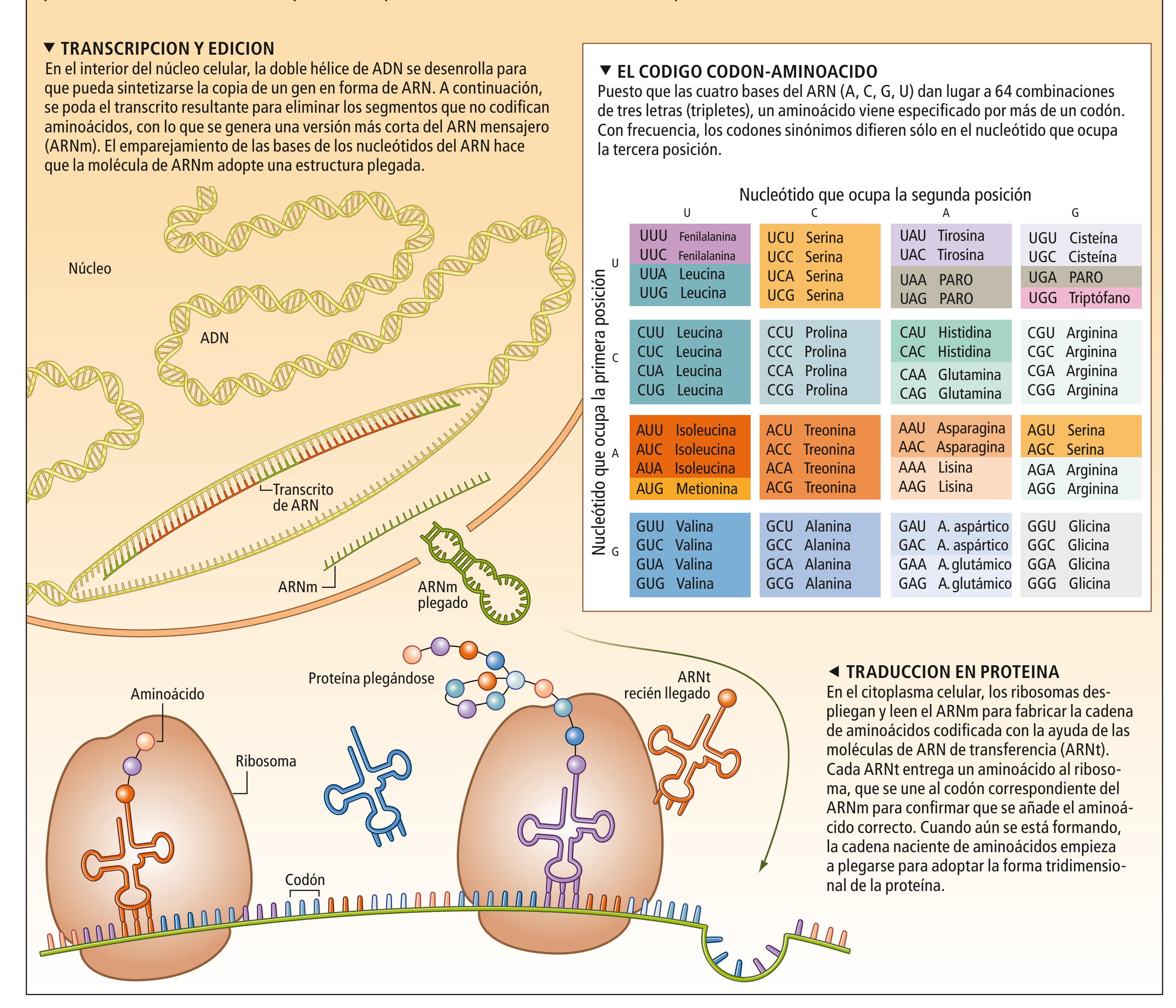
Preferencias

Abundan las mutaciones puntuales, de los tres primeros tipos, que repercuten en la salud humana. Tres mutaciones puntuales en los genes que codifican las proteínas que forman la hemoglobina de los hematíes son responsables de otras tantas enfermedades graves. En la anemia falciforme, una mutación con sentido equivocado intercambia un aminoácido hidrofílico (con afinidad por el agua) por otro hidrofóbico (que evita el agua); la proteína se aglutina y da lugar a las células sanguíneas con forma de hoz. En la policitemia, una mutación sin sentido trunca una de las proteínas de la hemoglobina; la sangre se hace más espesa. Por fin, en la talasemia, una mutación con sentido cambia un codón de paro (TAA) por el codón correspondiente a la glutamina (CAA); la proteína originada, mucho más larga, no sirve para la misión asignada.

Hasta el decenio de los ochenta del siglo pasado los expertos no se percataron de que las mutaciones silenciosas podían también repercutir en la síntesis de proteínas, al menos en bacterias y levaduras. Se realizó en aquella época un descubrimiento clave: los genes de esos organismos no utilizaban los codones sinónimos en la misma proporción. Cuando la bacteria *Escherichia coli* especifica el aminoácido asparagina, el codón AAC aparece en su ADN con mayor frecuencia que el codón AAT. No tardó en vislumbrarse la razón de ese uso preferencial: las células utilizaban determinados codones de forma preferente porque de ese modo incrementaban la velocidad o la precisión de la síntesis de proteínas.

CODIGO DE SILENCIO

El código genético, que dirige la traducción, vía ARN, de las instrucciones del ADN en proteínas funcionales, muestra una propiedad atípica: es redundante. Los genes "escritos" en los nucleótidos del ARN deletrean la secuencia de aminoácidos de una proteína codificada mediante palabras de tres letras (codones) que se corresponden con uno de los 20 aminoácidos (*tabla*). Con un alfabeto basado en las cuatro bases de los nucleótidos pueden formarse 64 tripletes o codones, por lo que habrá varios codones que especifiquen el mismo aminoácido. Por tanto, en términos proteicos, una mutación en el ADN que cambie uno de esos codones por su sinónimo debería ser "silenciosa".



▼ TRANSCRIPCION Y EDICION
En el interior del núcleo celular, la doble hélice de ADN se desenrolla para que pueda sintetizarse la copia de un gen en forma de ARN. A continuación, se poda el transcrito resultante para eliminar los segmentos que no codifican aminoácidos, con lo que se genera una versión más corta del ARN mensajero (ARNm). El emparejamiento de las bases de los nucleótidos del ARN hace que la molécula de ARNm adopte una estructura plegada.

▼ EL CODIGO CODON-AMINOACIDO
Puesto que las cuatro bases del ARN (A, C, G, U) dan lugar a 64 combinaciones de tres letras (tripletes), un aminoácido viene especificado por más de un codón. Con frecuencia, los codones sinónimos difieren sólo en el nucleótido que ocupa la tercera posición.

Nucleótido que ocupa la segunda posición

Nucleótido que ocupa la primera posición	U	C	A	G
U	UUU Fenilalanina UUC Fenilalanina UUA Leucina UUG Leucina	UCU Serina UCC Serina UCA Serina UCG Serina	UAU Tirosina UAC Tirosina UAA PARO UAG PARO	UGU Cisteína UGC Cisteína UGA PARO UGG Triptófano
C	CUU Leucina CUC Leucina CUA Leucina CUG Leucina	CCU Prolina CCC Prolina CCA Prolina CCG Prolina	CAU Histidina CAC Histidina CAA Glutamina CAG Glutamina	CGU Arginina CGC Arginina CGA Arginina CGG Arginina
A	AUU Isoleucina AUC Isoleucina AUA Isoleucina AUG Metionina	ACU Treonina ACC Treonina ACA Treonina ACG Treonina	AAU Asparagina AAC Asparagina AAA Lisina AAG Lisina	AGU Serina AGC Serina AGA Arginina AGG Arginina
G	GUU Valina GUC Valina GUA Valina GUG Valina	GCU Alanina GCC Alanina GCA Alanina GCG Alanina	GAU A. aspártico GAC A. aspártico GAA A. glutámico GAG A. glutámico	GGU Glicina GGC Glicina GGA Glicina GGG Glicina

◀ TRADUCCION EN PROTEINA
En el citoplasma celular, los ribosomas despliegan y leen el ARNm para fabricar la cadena de aminoácidos codificada con la ayuda de las moléculas de ARN de transferencia (ARNt). Cada ARNt entrega un aminoácido al ribosoma, que se une al codón correspondiente del ARNm para confirmar que se añade el aminoácido correcto. Cuando aún se está formando, la cadena naciente de aminoácidos empieza a plegarse para adoptar la forma tridimensional de la proteína.

TAMI TOLPA

Resultó que, por regla general, los ARNt correspondientes a tales codones sinónimos no abundaban igual en el interior de la célula. Por tanto —y esto es lo más importante—, un gen que contenga un número mayor de los codones que se corresponden con los ARNt más abundantes se traducirá con mayor prontitud, ya que la mayor concentración de esos ARNt hará que sea más probable que estén presentes cuando se les necesite. En otros casos, cierta variedad de ARNt se une a varios codones sinónimos pero se une con más facilidad a un codón determinado, de modo que el uso del codón en cuestión maximiza la precisión de la traducción. En consecuencia, una célula tiene buenas razones para no utilizar todos los codones por igual.

Como era de esperar, en bacterias y levaduras, los genes que codifican proteínas abundantes muestran el mayor uso preferencial de los codones: los codones favoritos son los que se corresponden con los ARNt más abundantes o con los ARNt a los que se unen mejor. Observaciones posteriores en otros organismos, incluidos plantas, moscas y gusanos, pusieron de manifiesto unas preferencias similares.

A la vista de tan variado surtido de especies que se valen de la estrategia para mejorar

ALTERACION DEL CORTE Y EMPALME

Los codones sinónimos pueden especificar el mismo aminoácido, pero una mutación que cambie un codón por su sinónimo puede alterar el mensaje codificado por un gen si interfiere con la edición celular del ARNm. Ese tipo de errores son causa de numerosas enfermedades. Un gen implicado en la fibrosis quística ilustra el modo en que las mutaciones "silenciosas" pueden alterar el mensaje proteínico codificado en un gen (*abajo*).

EDICION NORMAL DEL ARN

El transcrito primario de un gen contiene segmentos que codifican aminoácidos (exones) y largos segmentos no codificantes (intrones), que no deben estar presentes en el ARNm final. En cada exón, secuencias cortas de nucleótidos operan a modo de potenciadores del corte y empalme (ESE, de "exonic splicing enhancer"), que indican a la maquinaria celular de edición dónde se hallan los extremos del exón. La unión de las proteínas que regulan la edición a los lugares intensificadores hace que las proteínas de los somites cirujanos ("spliceosome") se dirijan hacia los dos extremos del intrón y lo escindan del transcrito antes de empalmar los extremos de los exones.

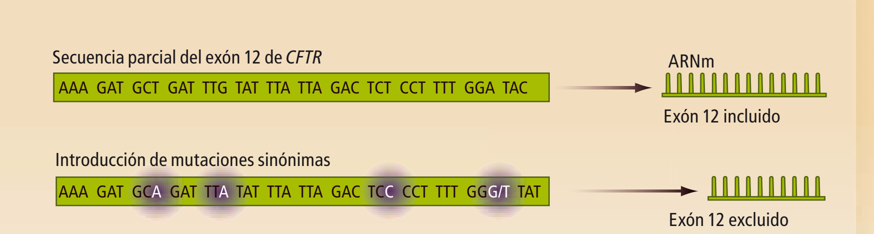
ARN transcrito a partir del gen
Exón
Intrón
Somites cirujanos
SR
ESE
ARNm

SALTARSE UN EXON

Cambios sinónimos de un nucleótido en un exón pueden hacer que las secuencias potenciadoras del corte y empalme se vuelvan invisibles para la maquinaria celular de edición, con lo que un exón entero queda excluido del ARNm final.

ALTERACION DE LA PROTEINA

Las mutaciones en el gen receptor que regula la conductancia transmembrana en la fibrosis quística (CFTR), inactivadoras de la proteína receptora, están relacionadas con ésta y otras enfermedades similares. En un experimento diseñado para comprobar si las mutaciones silenciosas podrían afectar también a la proteína CFTR, se introdujeron mutaciones de un solo nucleótido, una a una, para crear en el exón 12 de CFTR codones sinónimos; se analizaron luego las proteínas resultantes. Las seis mutaciones sinónimas mostradas hicieron que el exón 12 fuese ignorado durante la edición del ARNm, dando lugar a una versión truncada de la proteína CFTR.



la eficacia de la síntesis de proteínas, parecía probable que los mamíferos también la usaran. De hecho, el análisis de genes de mamíferos reveló una tendencia a favorecer determinados codones. Sin embargo, tamaña semejanza entre organismos sencillos y mamíferos resultó limitarse a la superficie.

Por razones que ignoramos, los genomas de mamíferos están organizados en grandes bloques, cada uno con un contenido de nucleótidos sesgado de forma característica. En unas regiones predominan las bases G y C; en otras, abundan A y T. En consecuencia, los genes que residen en una región del genoma rica en G y C tienden a tener muchos codones que contienen esas bases. Así pues, nuestros genes muestran preferencia por utilizar determinados codones pero, a diferencia de lo que ocurre en organismos más sencillos, el patrón que siguen no sugiere que el motivo sea la optimización de la síntesis de proteínas.

Durante años, esa serie de hallazgos parecía apoyar la tesis de la irrelevancia de las mutaciones silenciosas para el funcionamiento del organismo humano. Sin embargo, en los albores del siglo XXI, al estudiar en especies distintas el mismo gen, empezó a sospecharse que se andaba errado.

Mediante la comparación de las posiciones en las que se han producido cambios en los nucleótidos y en las que se han mantenido constantes, puede medirse la velocidad a la que han divergido las secuencias génicas de dos especies. En principio, cualquier mutación que no afecte a un organismo resulta invisible para las fuerzas de la selección natural, que conserva los cambios beneficiosos. Según se pensaba antaño, las regiones génicas invisibles a la selección incluirían los sitios en donde se

TAMI TOLPA

producen mutaciones silenciosas y el ADN no codificante (el 98 por ciento del genoma, que no especifica ninguna proteína).

Mas, cuando se miró si los lugares en donde se producían mutaciones silenciosas evolucionaban a la misma velocidad que las regiones no codificantes, se hallaron diferencias inesperadas, señal de que, después de todo, las mutaciones silenciosas podrían repercutir en la fisiología.

Romper el silencio

Al principio no se comprendía el modo en que ese tipo de mutaciones podía alterar en mamíferos la síntesis de proteínas. Más tarde, las investigaciones sobre enfermedades humanas han aportado no uno, sino muchos mecanismos. Las mutaciones silenciosas patógenas interfieren en varias etapas de la síntesis proteínica, desde la transcripción del ADN hasta la traducción del ARNm en proteínas.

Por botón de muestra, veamos las mutaciones silenciosas que alteran la edición del transcrito de un gen. Poco después de la transcripción de un gen en una molécula de ARN, el transcrito es sometido a una poda que elimina las regiones no codificantes (intrones). Igual que en el montaje de una película se van desechando las escenas sobrantes, la maquinaria celular de edición necesita encontrar los fragmentos buenos que codifican aminoácidos (exones), para luego cortarlos y empalmarlos (*splicing*) hasta alcanzar la versión final del ARNm del gen. Los genes humanos abundan en intrones (cada gen contiene una media de ocho largos intrones), de modo que la maquinaria celular necesita reconocer dónde comienza y dónde termina un exón.

Las investigaciones realizadas en los últimos años han puesto de manifiesto que los exones no sólo especifican aminoácidos, sino que también contienen, en su secuencia, información clave para la eliminación de los intrones. Destacan por su importancia los motivos que intensifican el corte y empalme de los exones. Nos referimos a los motivos ESE (de "exonic splicing enhancer"): secuencias cortas, de entre tres y ocho nucleótidos, que se alojan cerca de los extremos de los exones y señalan a la maquinaria de corte y empalme dónde hay un exón. La presencia necesaria de estos motivos explica que haya en los genes humanos preferencia hacia ciertos nucleótidos.

Aunque los codones GGA y GGG, que codifican la glicina, pueden ambos hallarse presentes en los ESE, el primero muestra una acción intensificadora más potente, con lo que su edición es más eficaz. De ahí que GGA se encuentre con mayor frecuencia cerca de los extremos de los exones.

Una investigación que realizamos con nuestra antigua colaboradora de la Universidad de Bath, Joanna L. Parmley, avala la importancia de conservar las secuencias de los codones en los potenciadores del corte y empalme. Según nuestros resultados, los motivos presentes en los exones que, en apariencia, operan a modo de intensificadores del corte y empalme muestran una evolución en sus codones sinónimos más lenta que la de las secuencias vecinas que no participan en el corte y empalme.

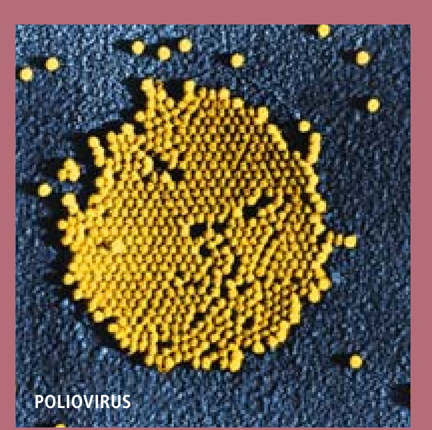
La lenta evolución de marras indica que la selección natural apenas ha cambiado los motivos potenciadores, porque sus secuencias específicas revisten suma importancia. Las alteraciones silenciosas de los codones que contienen esos potenciadores, aunque no cambian un aminoácido, sí provocan un efecto determinante sobre una proteína; lisa y llanamente, desbaratan la correcta eliminación de los intrones.

Cuando William Fairbrother y su grupo compararon los extremos de los exones, descubrieron que las personas nos parecemos bastante. Esas regiones asociadas al corte y empalme del ARN apenas varían, ni siquiera en los lugares donde una mutación resultaría silenciosa. No es que no se produzcan mutaciones en los extremos de los exones, sino que, cuando se producen, resultan tan

2. ESTAS CABRAS TRANSGENICAS son portadoras de genes que codifican la proteína butilcolinesterasa humana; ésta se extrae de su leche para fabricar un medicamento contra una toxina. La ingeniería genética se beneficiará de los conocimientos adquiridos sobre qué mutaciones sinónimas son realmente silenciosas y cuáles podrían afectar a la proteína resultante o a la eficacia con que se fabrica.

Vacuna trucada

La manipulación de los sitios donde se producen mutaciones sinónimas ha permitido diseñar genes que aceleran la síntesis de proteínas; al mismo método se recurre para minorarla. En el grupo que dirige Steffen Mueller, de la Universidad de Nieva York en Stony Brook, se han valido de esa estrategia para diseñar una vacuna más segura contra la polio. Los virus vivos resultan ser las vacunas más potentes porque provocan en el receptor una reacción inmunitaria intensa; pero las vacunas vivas pueden reproducirse y mutar, con lo que pueden causar enfermedades. El grupo de Mueller se apoyó en la preferencia de los microorganismos por el uso de determinados codones para maximizar la eficacia de la fabricación de proteínas: diseñaron un poliovirus que portaba los codones menos frecuentes y menos eficientes en las secuencias que codificaban la envoltura proteica. El virus resultante se autorreplicaba, aunque con mayor parsimonia. Tras introducir en ratones el virus transgénico, los animales quedaron protegidos frente a la infección cuando, posteriormente, fueron expuestos al poliovirus silvestre. Esta técnica, que aprovecha la preferencia hacia determinados codones para crear una vacuna viva pero más débil, podría aplicarse también a otros patógenos para fabricar vacunas potentes y más seguras.



POLIOVIRUS

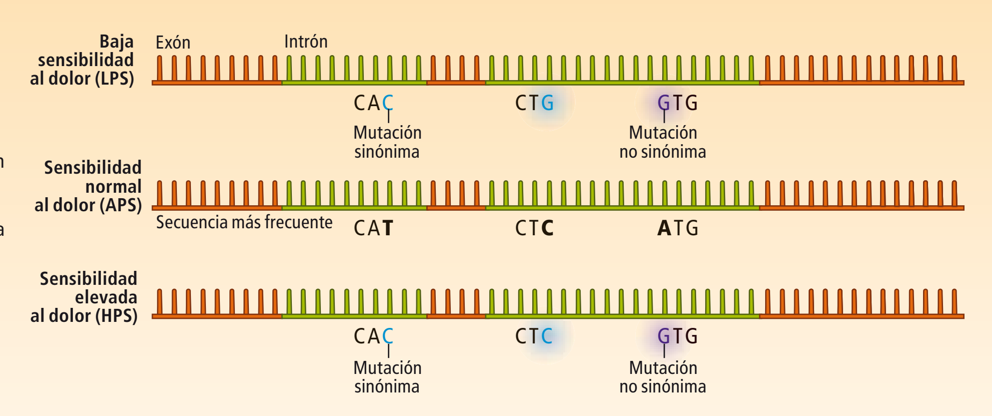
FUENTE: ADAPTADO DE "HUMAN CATECHOL-*O*-METHYLTRANSFERASE HAPLOTYPES MODULATE PROTEIN EXPRESSION BY ALTERING MRNA SECONDARY STRUCTURE", POR ANDREA G. NACKLEY ET AL., EN ***SCIENCE***, VOL. 314; DICIEMBRE DE 2006; CORTESIA DE PHARMATHENE (*cabras*); SCIENCE SOURCE *Photo Researchers, Inc.* (*poliovirus*)

MENSAJE AMORTIGUADO

Se ha descubierto que una mutación sinónima afecta a la sensibilidad al dolor porque altera la cantidad producida de cierta enzima crucial. Se producen en la forma del ARNm cambios que afectan a la facilidad con que los ribosomas desenrollan la hebra y la leen. Esa forma plegada modificada resulta del emparejamiento de los nucleótidos del ARNm. Una mutación sinónima puede, por tanto, alterar el emparejamiento de los nucleótidos.

VARIANTES DEL GEN *COMT*

Tres versiones frecuentes del gen que codifica la catecol-*O*-metiltransferasa (COMT) están relacionadas con una sensibilidad hacia el dolor baja (LPS, de "low pain sensitivity"), normal (APS) o elevada (HPS). Las diferencias entre la secuencia más frecuente (APS) y las otras variantes se producen en tres posiciones de los exones del gen; sin embargo, sólo uno de los cambios (*morado*) altera el aminoácido codificado. En un principio, se pensaba que ésa era la mutación que explicaba las diferencias en la sensibilidad al dolor observadas entre individuos; ahora bien, los sujetos con LPS y lo mismo los que sufrían HPS presentaban idéntico nucleótido (G) en dicha posición; no podía ser, pues, la única razón. Se descubrió que una de las mutaciones sinónimas (*azul*) daba cuenta del siete por ciento de la variación en la sensibilidad al dolor.



dañinas para la síntesis de proteínas, que tienden a ser conflictivas y a desaparecer de la población.

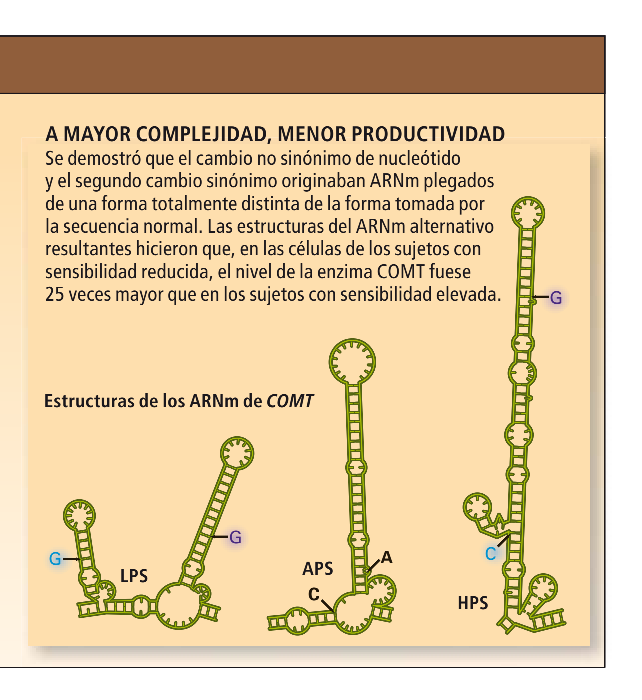
Hasta la fecha, se han relacionado con mutaciones silenciosas alrededor de 50 trastornos genéticos. Muchas de esas mutaciones parecen interferir también en la eliminación de intrones. Los potenciadores del corte y empalme pueden solaparse con un fragmento largo de la secuencia de un gen que codifica una proteína, lo que impone limitaciones notables sobre dónde se toleraría una mutación silenciosa.

Francisco Baralle, del Centro Internacional de Ingeniería y Biotecnología de Trieste, acaba de dar a conocer un ejemplo sorprendente del daño que puede provocar una mutación en un intensificador del corte y empalme. Los investigadores descubrieron que el 25 por ciento de las mutaciones que indujeron en un exón del gen *regulador de la conductancia transmembrana de la fibrosis quística* (*CFTR*) interrumpía el corte y empalme y, presumiblemente, contribuía así a la aparición de la fibrosis quística o de enfermedades relacionadas.

Ello no significa que la alteración del corte y empalme sea el único mecanismo que aplica las mutaciones silenciosas para causar enfermedades. Aun cuando los intrones se eliminen correctamente del transcrito de ARN, el ARNm podría no plegarse de forma correcta. Contrariamente a lo que suele representarse —por razones de simplicidad— en los libros de texto, un ARNm no corresponde a una cadena lineal y carente de estructura. Del mismo modo en que se forman parejas de nucleótidos entre las dos hebras del ADN, determinadas regiones de un ARNm pueden ser complementarias y se emparejarán dando lugar a una complicada estructura plegada de tallo-bucle. La forma en que se pliega un ARNm determina su estabilidad, que, a su vez, puede afectar a la velocidad con que es traducido por los ribosomas, así como a su posterior degradación por los mecanismos celulares encargados de "recoger la basura".

En el caso del gen *receptor de la dopamina D2* (codifica un receptor de la superficie celular que detecta la presencia del neurotransmisor dopamina), una mutación silenciosa hace que el ARNm se degrade más rápido de lo normal. En consecuencia, se sintetiza menos cantidad de la proteína codificada, lo que da lugar a trastornos cognitivos. Por el contrario, en el gen que codifica la catecol-O-metiltrasferasa (*COMT*), una mutación silenciosa aumenta el grado de plegamiento del ARNm, con la consecuencia plausible de la generación de regiones demasiado estructuradas que resultan difíciles de desplegar antes de la traducción, lo que disminuye la síntesis de la proteína. Andrea G. Nackley y su grupo, de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, descubrieron que esa mutación afectaba a la tolerancia al dolor (no por casualidad la investigación se realizó en una escuela de odontología).

Otro ejemplo de una mutación silenciosa que afecta a una proteína, y que corresponde a uno de los efectos más directos, concierne al gen *resistencia multifármaco 1*. Recibe ese nombre porque la proteína que produce es un transportador celular que, en las células cancerosas, ayuda a expulsar los fármacos utilizados en la quimioterapia, con lo que esas células se hacen resistentes a los medicamentos.



Chava Kimchi-Sarfaty y sus colaboradores, del estadounidense Instituto Nacional del Cáncer, descubrieron que el cambio silencioso hacía que el transportador proteínico se plegara de forma incorrecta, reduciendo la capacidad de la célula para expulsar los medicamentos. Puesto que los procesos de traducción y plegamiento proteínico ocurren de forma simultánea, los investigadores dedujeron que el codón sinónimo menos frecuente generado por la mutación silenciosa provocaba una pausa durante la traducción, que permitía a la proteína adoptar una estructura inusual. Se desconoce el motivo de esta hipotética pausa, un misterio que puede añadirse a la lista de cuestiones pendientes sobre el funcionamiento de genes y proteínas.

Genes eficientes, medicinas eficaces

Una lección que los científicos pueden aprender de los descubrimientos recientes sobre los efectos de las mutaciones silenciosas es que deben ser cautelosos antes de dar nada por sentado. Cuando se desconocía el mecanismo que relacionaba un cambio silencioso con una alteración en la síntesis de producción de proteínas, se confiaba en que las mutaciones sinónimas debían ser "silenciosas". Pero a la luz de los ejemplos anteriores, esa postura resulta inasumible.

Reconocer el poder de las mutaciones "no tan silenciosas" está empezando a ayudar a mejorar los métodos utilizados en ingeniería genética. Saber qué nucleótidos de un gen deben mantenerse y cuáles podrían reemplazarse tiene una aplicación inmediata en la biotecnología. La terapia génica y la fabricación industrial de proteínas (fármacos, por ejemplo), que utilizan animales o microorganismos, se basan en la capacidad para diseñar y fabricar un gen e insertarlo en el genoma de una célula. La creación de genes eficientes está plagada de obstáculos: entre otros, asegurarse de que el transgén recién introducido sea activado por la célula y se produzcan las cantidades adecuadas de la proteína que codifica. Aquí entra entonces en juego la sensibilidad hacia los efectos de las mutaciones sinónimas, pero no silenciosas.

En los genes humanos, la mayoría de los intrones parecen ser prescindibles (sólo uno, generalmente el primero, es necesario para que el gen dé lugar a una proteína). Ello significa que los transgenes pueden compactarse mediante la eliminación de los intrones. También implica que algunos de los lugares donde se producen mutaciones silenciosas podrían ser modificados, sin que con ello se produjeran efectos perjudiciales, porque al haber descartado los intrones, los potenciadores del corte y empalme ya no serían necesarios. Libres de esta restricción, los genetistas podrían aprovechar los lugares silenciosos para otros fines.

Un experimento reciente realizado en el Instituto Internacional de Biología Molecular y Celular de Varsovia ilustra cómo se podrían manipular, para beneficio de los humanos, los sitios donde se producen mutaciones silenciosas. Grzegorz Kudla y sus colaboradores tomaron tres genes. Cambiaron la proporción relativa de determinadas bases de los nucleótidos en los sitios silenciosos y transfirieron luego los genes modificados a células de mamífero. Sorprendentemente, un aumento en el contenido en G y C hizo que la actividad génica y la síntesis de proteínas fuesen hasta 100 veces más eficientes que en las versiones de esos mismos genes que contenían menos G y C.

Los nuevos conocimientos adquiridos deberían catapultarnos para ahondar en las causas de enfermedades. En la búsqueda de genes responsables de enfermedades resultan fundamentales los proyectos de secuenciación del genoma y de catalogación de las variaciones génicas observadas en humanos. Hoy en día, mediante la identificación de todas las mutaciones puntuales (polimorfismos de un solo nucleótido, o SNP) en individuos que padecen una enfermedad determinada, los científicos dirigen su atención hacia las regiones del genoma que contienen las variantes génicas que podrían causar la patología.

Hasta hace poco, ese tipo de investigaciones daba por sentado que, si varias mutaciones génicas mostraban correlación con un trastorno, las variantes causantes de la enfermedad

Los autores

J. V. Chamary y **Laurence D. Hurst** aplicaron la bioinformática al estudio de la evolución de las secuencias genómicas en la época en que Chamary preparaba su doctorado en el laboratorio de Hurst, en la Universidad de Bath. Hurst, merecedor del premio Wolfson que concede la Regia Sociedad de Londres, es catedrático de genética evolutiva; centra su trabajo en el estudio de las fuerzas que dan forma a los genes y a los genomas.

deberían ser las que cambiaban la secuencia aminoacídica de la proteína. El gen *COMT*, relacionado con la tolerancia al dolor, presenta una mutación que cambia un aminoácido por otro; durante mucho tiempo se supuso que esa variante era la única causante de la intolerancia al dolor. Sin embargo, se demostró que individuos con una tolerancia al dolor muy alta o muy baja presentaban los mismos nucleótidos en el lugar correspondiente a esa mutación, lo que indicaba que debía de haber otra razón para explicar sus diferencias.

Los resultados experimentales que demostraron que las responsables eran las mutaciones silenciosas en *COMT* se aceptaron sólo cuando se desentrañó el mecanismo mediante el cual éstas podrían provocar un efecto.

Es probable que las causas de algunas enfermedades se hayan atribuido erróneamente a mutaciones que provocan cambios en proteínas, cuando, en verdad, las responsables son mutaciones sinónimas. Los investigadores deben tenerlo presente cuando buscan una "aguja" mutacional dañina en el "pajar" genómico. Y, ¿quién sabe qué otros mecanismos patógenos aparecerán tras este tipo de búsquedas?

¿Indican los hallazgos realizados hasta la fecha que las mutaciones silenciosas son causa frecuente de enfermedad? Quizá sí. Podría argumentarse que los cambios silenciosos revisten un interés conceptual y encierran cierto potencial práctico, pero que no se ha demostrado que sean nocivos. Sin embargo, la investigación sobre la evolución de los genes pone en entredicho, por demasiado condescendiente, esta forma de ver las cosas.

Hace varios años, uno de los autores (Hurst) demostró que en un segmento del gen *BRCA1* (relacionado con la aparición temprana del cáncer de mama), los lugares silenciosos evolucionaban muy despacio, en roedores y en humanos. Por el contrario, el resto de las secuencias de este segmento génico evolucionaban a una velocidad normal. Ello no significa que las mutaciones de los lugares silenciosos que evolucionan lentamente sean raras, sino que los individuos que las portan mueren sin trasmitirlas a su descendencia. Andando el tiempo, se demostró que el segmento coincidía con el lugar donde se encontraba un potenciador del corte y empalme; dicho de otro modo, se trataba de otro ejemplo de una región donde la mutación silenciosa resultaba tan perjudicial, que sus portadores se extinguían.

¿Cuán frecuentes son los segmentos génicos sometidos a la presión de la selección natural para que los lugares silenciosos no varíen? En busca de respuesta, Hurst y Parmley abordaron, en los genes, regiones donde la velocidad de mutación de los lugares silenciosos difería del ritmo de los lugares que sí provocaban cambios en los aminoácidos. Para nuestra sorpresa, descubrimos que los segmentos del ADN que contenían lugares silenciosos con velocidades evolutivas extraordinariamente lentas eran bastante frecuentes. De hecho, abundaban más que las regiones donde los aminoácidos codificados evolucionan con una celeridad excepcional. Por término medio, en una secuencia génica aparece un fragmento con lugares muy conservados, en los que se producen mutaciones silenciosas por cada tramo de 10.000 a 15.000 nucleótidos.

Estimamos que entre el cinco y el diez por ciento de los genes humanos contienen al menos una región donde las mutaciones silenciosas podrían resultar perjudiciales. Peter Schattner y Mark Diekhans, de la Universidad de California en Santa Cruz, llevaron a cabo un análisis similar, en busca de regiones génicas extensas con lugares silenciosos hiperconservados. Estimaron que había alrededor de 1600 bloques con esas características en los casi 12.000 genes examinados, lo que coincide con nuestras observaciones. Sin embargo, es muy posible que ambas estimaciones se queden cortas y que la cifra real sea mayor. Si esos lugares conservados indican dónde se alojan las mutaciones silenciosas patógenas, ignorarlos conducirá inevitablemente a una identificación errónea de las mutaciones relacionadas con enfermedades.

El reconocimiento de que la selección natural tiene en cuenta las "no tan silenciosas" mutaciones ha ido de la mano del descubrimiento de que la síntesis proteínica entraña mayor complejidad de lo que se pensaba [*véase* "El otro genoma", por Gil Ast; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio 2005].

Los modos en que evolucionan y operan los genes se hallan íntimamente ligados, hasta un punto difícilmente imaginable hace tan sólo un decenio. La investigación de esos procesos permitirá esclarecer la extraordinaria complejidad del funcionamiento de los genomas. El ADN no es una molécula lineal, sino que está arrollada en una suerte de bobinas que tienen que desenrollarse para que pueda ocurrir la transcripción. El control de ese proceso ¿ha dejado también su huella en forma de lugares silenciosos? Análogamente, los tramos que contienen codones raros dispuestos en serie son más frecuentes de lo que debieran; ¿cuál es su función?

Las respuestas a estas y otras cuestiones relacionadas no sólo nos permitirán ahondar en la síntesis de proteínas, sino que también abrirán nuevas vías terapéuticas.

Bibliografía complementaria

LA EVOLUCION CODIFICADA. Stephen J. Freeland y Laurence D. Hurst en *Investigación y Ciencia*, págs. 60-67; junio de 2004.

HEARING SILENCE: NON-NEUTRAL EVOLUTION AT SILENT SITES IN MAMMALS. J. V. Chamary, Joanna L. Parmley y Laurence D. Hurst en *Nature Reviews Genetics*, vol. 7, n.º 2, págs. 98-108; febrero de 2006.

HUMAN CATECHOL-*O*-METHYLTRANSFERASE HAPLOTYPES MODULATE PROTEIN EXPRESSION BY ALTERING MRNA SECONDARY STRUCTURE. Andrea G. Nackley y col. en *Science*, vol. 314, págs. 1930-1933; diciembre de 2006.

SILENT POLYMORPHISMS SPEAK: HOW THEY AFFECT PHARMACOGENOMICS AND THE TREATMENT OF CANCER. Zuben E. Sauna, Chava Kimchi-Sarfaty, Suresh V. Ambudkar y Michael M. Gottesman en *Cancer Research*, vol. 67, n.º 20, págs. 9609-9612; 15 de octubre de 2007.

SPLICING IN DISEASE: DISRUPTION OF THE SPLICING CODE AND THE DECODING MACHINERY. G.-S. Wang y T. A. Cooper en *Nature Reviews Genetics*, vol. 8, n.º 10, págs. 749-761; octubre de 2007.

Repensar la oferta monetaria mundial

Sería muy beneficioso que las reservas internacionales dependieran menos del dólar estadounidense

Jeffrey D. Sachs

El pasado mes de marzo, el Banco Popular de China sacudió el mundo financiero proponiendo un nuevo acuerdo monetario. La propuesta atrajo la atención sobre todo porque era una muestra del creciente poder económico mundial de China, pero su contenido es también muy encomiable.

Hace un siglo casi todas las monedas del mundo estaban ligadas al oro, y las que no, en su mayoría, a la plata. Las monedas eran fácilmente intercambiables; el oro fijaba los tipos de cambio y el suministro de oro físico estabilizaba a largo plazo la oferta de dinero.

El patrón oro se desplomó tras la Primera Guerra Mundial. La financiación de la guerra con papel moneda sin aval originó una inflación generalizada. Las naciones europeas intentaron reanudar el patrón oro en el decenio de 1920 pero la oferta de oro era insuficiente e inelástica. Tras eso vinieron una feroz restricción monetaria y una competencia entre los países por las reservas limitadas de oro; ambas tendencias contribuyeron a la Gran Depresión. Después de la Segunda Guerra Mundial, las naciones adoptaron el patrón oro-dólar. Al dólar estadounidense lo avalaba el oro, a 35 dólares la onza, mientras que a las monedas del resto del mundo las avalaban los dólares. La oferta monetaria global podía expandirse gracias a las reservas de dólares.

El presidente Richard Nixon desligó el dólar del oro en 1971 (para compensar las políticas monetarias expansivas de EE.UU. en la era de Vietnam) y las monedas más importantes empezaron a fluctuar con respecto a las demás. Pero la mayoría del comercio mundial y las transacciones seguían haciéndose en dólares, así como las reservas de divisas de los bancos centrales del mundo. Los tipos de cambio de muchas monedas se mantuvieron muy ligados al dólar.

Este papel especial del dólar en el sistema monetario internacional ha contribuido a la magnitud global de la crisis actual, cuyo origen es la combinación de políticas demasiado expansivas por parte de la Reserva Federal y la laxitud de las regulaciones financieras. El dinero fácil alimentó una oleada de créditos bancarios sin precedentes, primero en EE.UU. y después en el resto del mundo, ya que los propios bancos internacionales se financiaban en los mercados monetarios estadounidenses. A medida que los créditos bancarios fluyeron a otras economías, muchos bancos centrales extranjeros intervinieron para mantener la estabilidad de sus monedas con respecto al dólar. La hipertrofia de la oferta de dinero en EE.UU. se aparejó con una hipertrofia de las ofertas de dinero en los países ligados al dólar estadounidense. El resultado fue una burbuja transitoria mundial de crédito, seguida de una ola de préstamos en mora, caída de los precios de la vivienda, pérdidas bancarias y una espectacular restricción de los préstamos bancarios.

Ahora China propone que el mundo pase a un sistema monetario más simétrico, en el que las naciones fijen el valor de sus monedas conforme a una cesta representativa de varias divisas, en vez de referirse solamente al dólar. Los "derechos especiales de giro" del Fondo Monetario Internacional se definen por una cesta de ese tipo, formada por cuatro divisas (dólar, libra, yen y euro), aunque los chinos sugieren, con razón, que debería ampliarse para reflejar una mayor variedad, e incluir el yuan chino. La política monetaria de EE.UU. perdería, en consecuencia, su influencia mundial excesiva en la oferta monetaria y en las condiciones de los créditos. En promedio, el dólar debería depreciarse con respecto a las monedas asiáticas para propiciar más exportaciones netas de EE.UU. a Asia. El euro debería probablemente fortalecerse con respecto al dólar, pero debilitarse con respecto a las monedas asiáticas.

La respuesta de EE.UU. a la propuesta china fue reveladora. El secretario del Tesoro Timothy Geithner declaró en un principio que estaba abierto a explorar la idea, una franqueza que rápidamente provocó que el dólar perdiera valor, lo cual es necesario para el bien de la economía estadounidense. Ese debilitamiento, sin embargo, hizo que Geithner cambiara de idea inmediatamente y subrayase que el dólar estadounidense continuaría siendo la divisa de reserva mundial en el futuro inmediato.

La primera reacción de Geithner era la correcta. Aunque la propuesta china requiere cierto estudio, parece congruente con el cambio a largo plazo hacia una economía mundial más equilibrada, en la que EE.UU. desempeñe un papel monetario más parejo al de Europa y Asia. Ninguna modificación del sistema monetario global ocurrirá abruptamente, pero los cambios venideros no están bajo el control único de EE.UU. Probablemente nos encaminaremos con el tiempo a un mundo de mayor cooperación monetaria dentro de Asia, donde el papel del yuan será más importante y en general habrá una mayor simetría en las relaciones monetarias y financieras mundiales.

MATT COLLINS

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

Refinerías de petróleo

Destilados del carbono

Mark Fischetti

Combustible para calderas y para motores a reacción, queroseno y plásticos. Esos productos, entre muchos más, se extraen del crudo de petróleo contenido en una torre de desvaporizado, se descargan y se afinan a su paso por un asombroso y desconcertante laberinto de tuberías.

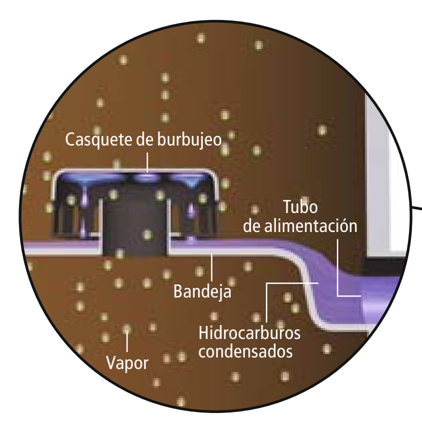
El petróleo crudo contiene centenares de hidrocarburos. Pero las refinerías estadounidenses convierten la mitad del total de crudo en gasolina, una mezcla de combustibles, sobre todo 2,2,4-trimetilpentano (cadena de ocho átomos de carbono) y heptano (de siete átomos de carbono). Cuanto más compleja es la cadena, más puede comprimirse la molécula antes de que se inflame espontáneamente, mayor es el índice de compresión del motor y, por tanto, mayor la potencia útil del mismo. La mezcla de ensayo para determinar el índice de octanos (octanaje) de una gasolina contiene 2,2,4-trimetilpentano y heptano (87 por ciento y 13 por ciento para una gasolina de "87 octanos").

Hace tiempo que las refinerías ensayan aditivos para aumentar el octanaje. El plomo tetraetilo dio buenos resultados, pero se descartó porque estropeaba los convertidores catalíticos. Los fabricantes se pasaron al éter butílico terciario metílico (MTBE, por sus siglas en inglés), pero se ha visto que contamina las aguas subterráneas; los gobiernos federales lo están prohibiendo. Una alternativa cada vez más extendida es el etanol, con un octanaje de 108 o 110; se comercializa con el nombre de gasohol una gasolina con un 10 por ciento de alcohol.

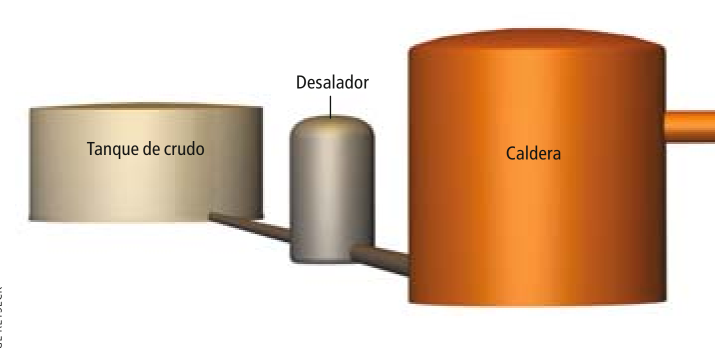
Hace treinta años que en EE.UU. no se construye una refinería, debido a la oposición pública ("no en mi barrio") y a los obstáculos para obtener las licencias ambientales. Según Harold Schobert, profesor de ciencia de los combustibles y director del Instituto para la Energía en la Universidad estatal de Pennsylvania, aunque se han ampliado algunos de los procesos ya existentes, a escala nacional las refinerías están operando con una utilización superior al 90 por ciento. Por lo que, si una o dos plantas dejan de funcionar, como ocurrió durante el huracán Katrina, faltará capacidad de refinado y subirán los precios de venta al público.

Además, no es posible responsabilizar a las refinerías —tal como se ha hecho— por la inclemente subida de los precios. Según la Administración de Información Energética de EE.UU., la etapa de refinado responde sólo del 18 por ciento del precio final (el 47 por ciento corresponde al crudo, el 23 por ciento a los impuestos y el 12 por ciento a la distribución y venta al detalle). Los márgenes de las refinerías, afirma Schobert, son de muy pocos centavos por litro. Unos beneficios reducidos, amén de la resistencia pública, brindan pocos incentivos a las compañías para invertir los dos mil millones de dólares o más que se necesitan para construir una planta.

1. EN LA REFINERIA, el crudo se lleva a ebullición; se introducen los vapores en la columna de destilación, por la que ascienden y se condensan conforme se enfrían por debajo de su punto de ebullición. Los hidrocarburos de cadenas largas y complejas (fracciones) se condensan a temperaturas elevadas, cerca del fondo; los hidrocarburos cortos y más simples se condensan a temperaturas inferiores, ya hacia el extremo. Los productos se refinan aún más mediante los procesos secundarios de craqueado y reformado.



2. UNAS BANDEJAS PERFORADAS permiten el paso de los vapores a los platillos de burbujeo, donde se condensan y penetran en los tubos de alimentación.



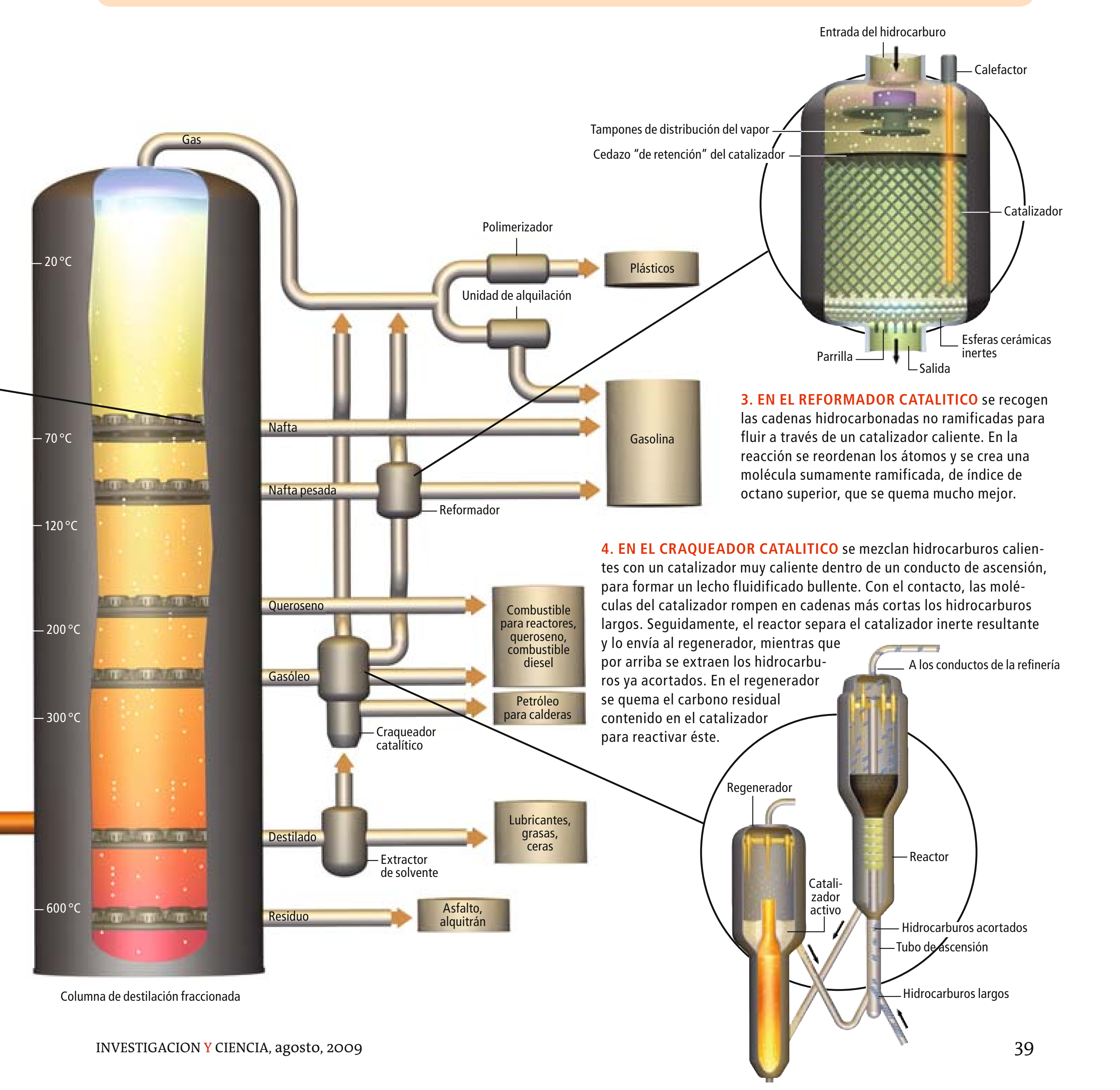
GEORGE RETSECK

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **ESTORBO:** Cuando en el decenio de los cincuenta del siglo XIX empezó a escasear el aceite de ballena para las lámparas, los canadienses convirtieron en queroseno el petróleo de afloración. Rusia ya había perforado pozos de petróleo de prueba, pero la industria se disparó en 1859, cuando el industrial americano George Bissell contrató a Edwin Drake la perforación de un pozo cerca de Oil Creek (Pennsylvania). Producía éste parafina, que se destilaba sin dificultades en queroseno. La gasolina, un subproducto, se desechaba como estorbo.

➤ **UNA PALABRA - PLASTICOS:** Algunos crudos contienen propano y butano disueltos, que se extraen al final de la columna de destilación. El propano se convierte después en propileno para uso en textiles, empaques de alimentos y componentes de automoción. El butano se convierte en butanodieno para caucho sintético. La mayor parte del etileno (base de los polietilenos que se encuentran en los contenedores y embalajes de plástico) se refina en un craqueador "térmico" de alta temperatura y baja presión. El craqueador descomprime los hidrocarburos, un par de átomos de carbono cada vez. Cada pareja doblemente enlazada corresponde a una molécula de etileno.

➤ **LA OPEP, OTRA VEZ:** En los países de la OPEP está aumentando sustancialmente la capacidad de refinado. Las plantas en construcción incluyen una instalación de 600.000 barriles por día (bpd) en Kuwait y un yacimiento de 450.000 bpd en Arabia Saudita. India, China y Corea del Sur tienen también en cartera grandes ampliaciones. Arizona Clean Fuels se ha propuesto construir una refinería de 150.000 bpd en el condado de Yuma, pero no ha conseguido todavía toda la financiación necesaria.



Columna de destilación fraccionada

3. EN EL REFORMADOR CATALITICO se recogen las cadenas hidrocarbonadas no ramificadas para fluir a través de un catalizador caliente. En la reacción se reordenan los átomos y se crea una molécula sumamente ramificada, de índice de octano superior, que se quema mucho mejor.

4. EN EL CRAQUEADOR CATALITICO se mezclan hidrocarburos calientes con un catalizador muy caliente dentro de un conducto de ascensión, para formar un lecho fluidificado bullente. Con el contacto, las moléculas del catalizador rompen en cadenas más cortas los hidrocarburos largos. Seguidamente, el reactor separa el catalizador inerte resultante y lo envía al regenerador, mientras que por arriba se extraen los hidrocarburos ya acortados. En el regenerador se quema el carbono residual contenido en el catalizador para reactivar éste.

La regulación génica del de las abejas

El medio afecta al grado en que se expresen los genes. Las influencias del exterior se reflejan en mecanismos epigenéticos

Mireia Jordà y Miguel A. Peinado

CONCEPTOS BASICOS

- La abeja de la miel *Apis mellifera* es un insecto social que vive en comunidades muy estructuradas, formadas por castas, con un comportamiento social muy complejo.
- El desarrollo de ese comportamiento está regulado por el entorno social y va íntimamente asociado a cambios en la expresión de miles de genes.

La vida en la Tierra ha sufrido diversas transiciones durante su historia. Las células han evolucionado hasta convertirse en organismos multicelulares y éstos se han organizado en sociedades. Tanto los animales solitarios como los sociales han de ejecutar una serie de actividades para sobrevivir y reproducirse. Los animales sociales suelen acometerlas cooperativamente, y la cooperación requiere coordinación. Se usan varios mecanismos para lograr la coordinación, entre ellos la comunicación entre individuos y la adopción de formas de organización social que implican jerarquías y división del trabajo. La vida en sociedad está a menudo muy estructurada; en casi todas las actividades influye la interacción con otros miembros de la comunidad.

En los últimos decenios hemos asistido a un notable progreso en el conocimiento molecular del funcionamiento celular y del desarrollo, pero no del comportamiento social. Sólo recientemente se ha despertado el interés en desentrañar las bases moleculares del comportamiento social. Fruto del mismo ha nacido una nueva disciplina, la *sociogenómica*.

La sociogenómica se ocupa de identificar genes que influyen en el comportamiento social y su regulación, determinar qué función desempeñan en los mecanismos neurales y endocrinos implicados, explorar los efectos del entorno y valerse de los genes en cuestión para estudiar la evolución de la diversidad del comportamiento. La tarea viene facilitada por la secuenciación completa de un número creciente de genomas.

Se ha avanzado, sobre todo, en la identificación de genes que influyen en el comportamiento social y su evolución. Mediante técnicas basadas en la transcriptómica, se miden los cambios de expresión de genes —su transcripción en ARN mensajero (ARNm)— que están correlacionados con cambios en el comportamiento. Pero la cantidad de transcritos no refleja siempre la cantidad de las proteínas que codifican. Además, algunas diferencias en la expresión génica no son una consecuencia, sino una causa del cambio de comportamiento.

La abeja de la miel (género *Apis*) es uno de los organismos que se usan como modelo para el estudio molecular de la vida social. Contamos ya con la secuenciación de su genoma. Las abejas pueden ser solitarias o vivir en grupo. Según el tipo de comunidad se habla de abejas semisociales o eusociales. Las sociedades eusociales, las más estructuradas, se caracterizan por una división reproductiva del trabajo, solapamiento de generaciones y cooperación en el cuidado de la prole.

Se conocen más de 20.000 especies, muchas apenas estudiadas. La abeja de la miel muestra el comportamiento social más complejo (eusociales). La especie mejor investigada ha sido la abeja de la miel occidental (*Apis mellifera*). En sus colonias de abejas se distinguen tres tipos de castas, cada una con una función específica: las reinas, las obreras y los zánganos.

Las reinas, una por colonia, son las únicas hembras fértiles, viven durante un período diez veces mayor que las obreras, de ordinario entre 1 y 2 años, depositan los huevos de los cuales nacerán todas las demás abejas de la colonia (unos 2000 huevos por día) y almacenan el esperma de los zánganos durante años, sin que pierda su viabilidad.

Las obreras, decenas de miles por colonia, son hembras estériles y llevan a cabo, de forma altruista, las tareas requeridas para el desarro-

llo y crecimiento de la colonia: construir los panales, limpiar y mantener la colmena, criar las larvas, montar guardia y recolectar el néctar y el polen. Las obreras tienen habilidades cognitivas muy sofisticadas, a pesar de que su cerebro consta de sólo un millón de neuronas, cinco órdenes de magnitud menos que el cerebro humano y sólo cuatro veces más que el de *Drosophila*, un organismo de comportamiento mucho más simple. Las obreras aprenden a asociar el color de una flor, la forma y el olor a la ubicación de la comida. Para comunicar el hallazgo del sustento, emplean el "lenguaje de la danza". Las abejas de la miel están capacitadas para aprender conceptos abstractos, como "igual" y "diferente".

Los zánganos, las abejas macho, sólo viven durante la estación reproductiva de la colonia, pues su único propósito es fecundar a las reinas. Las diferencias entre castas no se dan sólo en el comportamiento, sino también en la morfología y la fisiología; las obreras y los zánganos son por lo general más pequeños que las reinas.

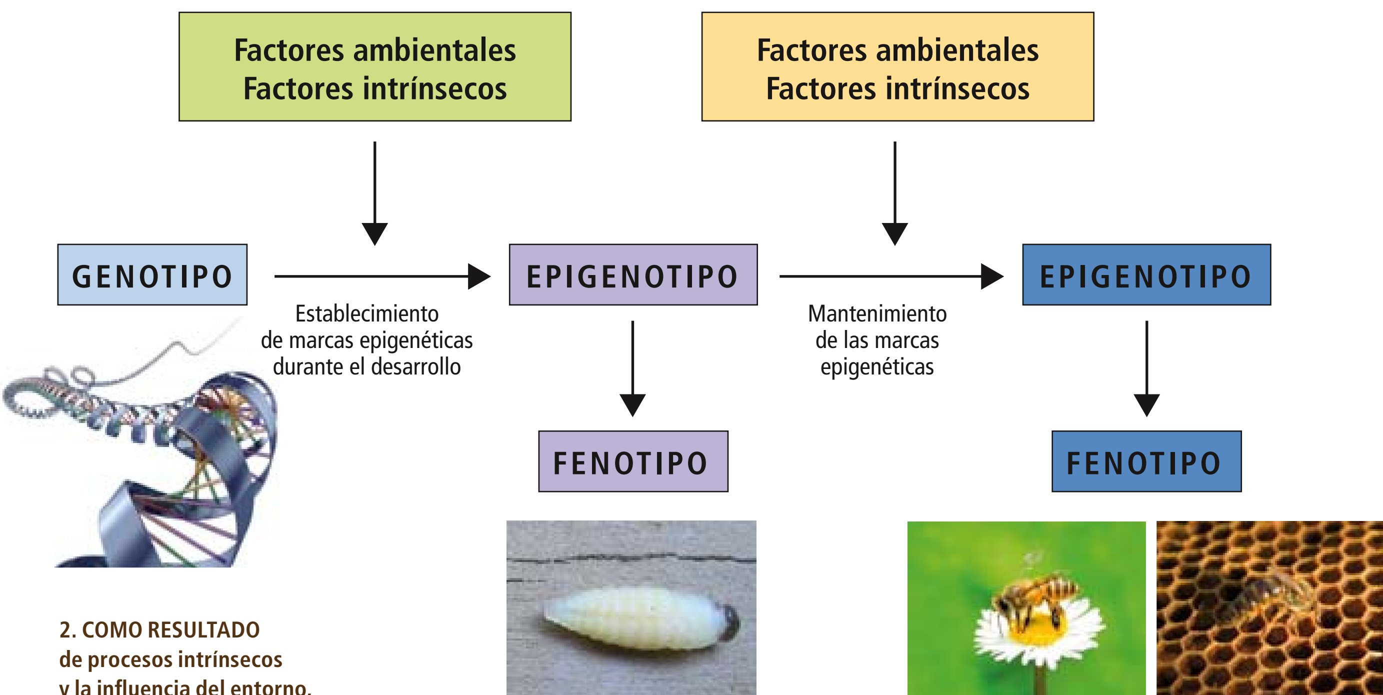
Las abejas de la miel son insectos himenópteros, los cuales se caracterizan por ser haplodiploides: los machos se desarrollan a partir de huevos sin fecundar haploides (con una sola versión de cada cromosoma), mientras que las hembras nacen de huevos fecundados diploides (con dos versiones de cada cromosoma). Se ha demostrado que el desarrollo sexual está regulado por el gen *csd* (*complementary sex determiner*), que presenta 19 versiones alternativas o alelos. Las hembras tienen dos copias del gen y los machos sólo una, pero los mismos alelos se encuentran tanto en hembras como en machos; es decir, no hay alelos ligados al sexo. Si los huevos fecundados tienen dos copias iguales de *csd*, se convertirán en machos diploides estériles; las obreras los eliminarán. Se cree que las asimetrías entre los individuos de una colonia inducidas por la haplodiploidía desempeñan una importante función en la evolución de la eusociabilidad, en su mantenimiento o en ambos.

La diferenciación en reinas y obreras en las abejas de la miel se lleva a cabo a través de una nutrición distinta. Toda larva de menos de dos días es alimentada con jalea real, una sustancia muy nutritiva producida por las glándulas galactógenas de las obreras. Después del segundo día, la larva de las obreras pasa a un sistema progresivo de alimentación que consiste en una mezcla de jalea real con miel y polen. En cambio, la larva real es alimentada con jalea real durante todo el período de desarrollo. Esos patrones alimentarios diferentes determinan la casta de la abeja adulta. Por lo tanto, cualquier larva hembra de menos de

1. LAS ABEJAS OBRERAS de mayor edad defienden la colmena y recolectan polen y néctar en el exterior.

Los autores

Mireia Jordà y **Miguel A. Peinado** trabajan en el Instituto de Medicina Predictiva y Personalizada del Cáncer (IMPPC), en Barcelona. Su investigación se centra especialmente en los mecanismos genéticos y epigenéticos de la progresión tumoral. Han participado en el consorcio internacional para la secuenciación del genoma de la abeja. Esto último contribuyó a la primera identificación de la metilación del ADN como mecanismo epigenético en un insecto social. Mireia Jordà es bioquímica por la Universidad Autónoma de Barcelona e investigadora postdoctoral en el IMPPC. Miguel A. Peinado es biólogo por la Universidad de Barcelona y coordinador científico del IMPPC.



2. COMO RESULTADO de procesos intrínsecos y la influencia del entorno, durante el desarrollo se establecen patrones de metilación y otras modificaciones epigenéticas heredables, dando lugar al epigenotipo que determina los patrones de expresión génica y en consecuencia el fenotipo. Factores ambientales y nutricionales pueden intervenir en el mantenimiento de estos patrones epigenéticos alterando el epigenotipo y por tanto influyendo en el fenotipo.

dos días de edad puede crecer potencialmente como reina u obrera, y son las mismas obreras adultas quienes tienen el control sobre la determinación de la casta de las hembras. Usan este control para crear reinas cuando han perdido la que tenían o cuando la actuación de la existente es pobre.

La investigación con micromatrices (*microarrays* en inglés, técnica de análisis de las diferencias en la expresión que permite el estudio simultáneo de miles de genes) revela que existen diferencias importantes en la expresión de muchos genes entre las larvas destinadas a ser abejas reinas, las destinadas a desarrollarse como obreras y las bipotenciales (de menos de dos días). Se ha puesto de manifiesto que las larvas destinadas a obreras presentan una semejanza más estrecha con las larvas bipotenciales que las larvas reales: estas últimas tienen reprimida la expresión de muchos genes respecto a las larvas bipotenciales y a la vez expresan genes específicos, probablemente asociados a la casta de reina y relacionados con el metabolismo, lo cual podría explicar su mayor tasa de crecimiento y su mayor talla.

No sólo la determinación de castas viene regulada por programas de expresión génica específicos. También la división de tareas. En el curso de su vida, las obreras cumplen distintas funciones, acordes con la edad, fenómeno que se supone vinculado al desarrollo fisiológico de varias glándulas. Las abejas jóvenes alimentan y cuidan las larvas y la reina; las de mediana edad mantienen la colmena y almacenan la comida; y las de mayor edad defienden la colmena y recolectan polen y néctar en el exterior.

En condiciones normales, una abeja comienza a salir de la colmena a buscar comida hacia los 21 días de edad, una tarea que no abandonará el resto de su vida. Pero las abejas pueden acelerar, retrasar o incluso cambiar su comportamiento según las necesidades de la colonia. Esa plasticidad del comportamiento está controlada en gran medida por feromonas, sustancias químicas secretadas por individuos de una especie que causan alteraciones en la fisiología y en el comportamiento de otros miembros de la misma especie.

La feromona mandibular de la reina (QMP) es la feromona mejor caracterizada en la abeja de la miel; desempeña una función muy importante en la regulación social, pues evita la reproducción de las obreras inhibiendo el desarrollo de sus ovarios o retrasa la transición de obrera de interior a obrera de exterior. Con la técnica de micromatrices se ha puesto de manifiesto que QMP afecta la expresión de muchos genes en el cerebro de la abeja. La feromona activa genes correlacionados con las tareas en el interior de la colmena y reprime genes correlacionados con las tareas en el exterior. Pero no sólo la reina influye en el desarrollo de la conducta de la colonia: las obreras más viejas también pueden regularlo mediante otro tipo de feromonas.

La regulación social implica, pues, cambios en la expresión de genes, especialmente en el cerebro, en respuesta a estímulos comunitarios específicos, que, a su vez, repercuten en el comportamiento. El grupo encabezado por Gene E. Robinson, de la Universidad de Illinois, ha demostrado la estrecha asociación

TODAS LAS FOTOGRAFIAS: © *iStockphoto/SZE FEI WONG* (*abeja en flor*)

existente entre la expresión génica en el cerebro y la plasticidad del comportamiento. Con la técnica de micromatrices generaron patrones de expresión de ARN mensajero (ARNm) —es decir, midieron la frecuencia con que los genes correspondientes al ARNm se expresan— de 60 abejas que trabajaban cuidando la comida de la colmena (nodrizas) o recolectando comida en el exterior (exploradoras). Y lograron establecer, para 57 de las 60 obreras, qué labor desempeñaban; predijeron el comportamiento individual a partir del patrón de expresión de ARNm. Más concretamente, hallaron diferencias de expresión entre nodrizas y exploradoras en un 40 % de los aproximadamente 5500 genes analizados. Muchos de estos genes presentan una regulación social; así ocurre con el gen *foraging* o el gen *period*, cuyos niveles de ARNm en el cerebro son mayores en las obreras exploradoras que en las nodrizas.

Pero no sólo se dan diferencias de expresión cerebral. La hormona juvenil interviene en la función exploradora; sus niveles en sangre en obreras que trabajan en la colmena son menores que en obreras que buscan comida fuera de la colmena. Hay también diferencias de expresión en genes que codifican glándulas exocrinas que producen sustancias empleadas en diferentes tareas, como el mantenimiento de la colmena o la defensa.

En resumen, la determinación de castas y la división del trabajo en la abeja de la miel dependen de programas de expresión génica que cambian a lo largo de su desarrollo: unos genes se activan y otros se inhiben. Ahora bien, ¿de qué depende la expresión de los genes?

La expresión de los genes está regulada, en parte, por su promotor, una región de ADN situada al principio del gen. Esta región contiene sitios a los que se pueden unir factores de transcripción. Cuando un factor de transcripción se une a su secuencia específica de unión, la expresión del gen puede activarse. Mediante análisis informáticos se han encontrado cinco factores de transcripción que intervienen en el comportamiento de la abeja de miel, toda vez que muestran una correlación estadísticamente significativa con muchos genes regulados socialmente. Estos factores de transcripción son GAGA, Adf1, CF1, Snail y Dri, conocidos por su función en el desarrollo del sistema nervioso, en el aprendizaje olfatorio y en la unión de hormonas en *Drosophila*. Por ejemplo, CF1 se une *in vitro* al promotor de la hormona juvenil. Además, la expresión de CF1 se activa en respuesta a la hormona juvenil en la abeja adulta.

La expresión génica no depende sólo de los factores de transcripción. Cuando estas proteínas entran en el núcleo para unirse a las regiones promotoras se encuentran con la cromatina, que es un complejo nucleoproteico formado por ADN e histonas. Los genes se expresan o no según se den ciertas condiciones bioquímicas, como la metilación del ADN, las modificaciones covalentes de las histonas o la forma de la cromatina. Y esto es lo que estudia la epigenética, es decir, la herencia de patrones de expresión de genes que no vienen determinados por la secuencia de pares de bases del ADN.

La metilación del ADN constituye la marca epigenética mejor caracterizada. Consiste en la unión de moléculas de metilo $–CH_3$ a nucleótidos de ADN. En vertebrados se da sobre todo en las citosinas (C) seguidas por una guanina (G), esto es, en las C de los llamados dinucleótidos CpG. Esta reacción es catalizada por metiltransferasas de ADN. En la mayoría de los casos la adquisición y mantenimiento de la metilación del dinucleótido CpG induce represión génica, aunque hay ejemplos en que la metilación de secuencias específicas permite la expresión de genes vecinos.

Gracias a la secuenciación del genoma de la abeja de la miel y mediante análisis bioinformáticos, moleculares y bioquímicos se ha caracterizado en ese himenóptero un sistema de metilación del ADN completo y funcional, compuesto por metiltransferasas catalíticamente activas que son ortólogos de las metiltransferasas de ADN de los vertebrados —es decir, derivan evolutivamente de antepasados comunes a insectos y mamíferos— y por dos isoformas —variantes generadas por cambios en nucleótidos sueltos— con dominios de unión a citosinas metiladas. El estudio revela que en la abeja la metilación del ADN tiene lugar también en las citosinas situadas en el dinucleótido CpG, igual que ocurre en vertebrados.

Recientemente, se ha demostrado que la inhibición de la metiltransferasa de ADN 3 (Dnmt3) en larvas produce un efecto similar a la alimentación con jalea real, de manera que la mayoría de las larvas se desarrollan como reinas. Esto demuestra que la epigenética es el interlocutor del ambiente con la genética y puede explicar la acción del estilo de vida, por ejemplo la nutrición, sobre los genes. Dado el carácter social de la abeja de la miel y el hecho de que su genoma responde dinámicamente a los cambios en el entorno, el profundizar en los mecanismos epigenéticos de este insecto puede ser clave para entender mejor la regulación génica de su comportamiento social. Tras la secuenciación del genoma de la abeja de miel, el siguiente reto es el estudio epigenético.

Bibliografía complementaria

GENE EXPRESSION PROFILES IN THE BRAIN PREDICT BEHAVIOR IN INDIVIDUAL HONEY BEES. C. W. Whitfield et al. en *Science*, vol. 302, págs. 296-299; 2003.

INSIGHTS INTO SOCIAL INSECTS FROM THE GENOME OF THE HONEYBEE APIS MELLIFERA. Honeybee Genome Sequencing Consortium en *Nature*, vol. 443, págs. 931-949; 2006.

FUNCTIONAL CPG METHYLATION SYSTEM IN A SOCIAL INSECT. Y. Wang et al. en *Science*, vol. 314, págs. 645-647; 2006.

NUTRITIONAL CONTROL OF REPRODUCTIVE STATUS IN HONEYBEES VIA DNA METHYLATION. R. Kucharski et al. en *Science*, vol. 319, págs. 1827-1830; 2008.

El sino de Ugarit

Un eclipse de Sol no prometía nada bueno al reino de Ugarit, amenazado por los belicosos "pueblos del mar"

Joachim Bretschneider y Klaus-Dieter Linsmeier

"En el sexto segmento del día de la luna nueva del mes Iyya, el Sol se escondió, su portero es Resheph. Se examinaron dos hígados. ¡Peligro!"

Con mano temblorosa, un sacerdote del oráculo escribió hace casi 3200 años esa nota en una tablilla de arcilla y la mandó al palacio de la próspera metrópoli de Ugarit. El eclipse total de sol hizo que se procediese a la adivinación en los hígados de dos ovejas sacrificadas. El eclipse dejó a oscuras la ciudad y el reino de Ugarit en un día importante del culto a los muertos (al que remite también el dios citado: Resheph era el dios que al anochecer abría al Sol el acceso al averno). ¿Qué otra cosa podía significar ese augurio sino que los poderes malignos traerían muerte y destrucción? Estalló un pánico colectivo; con el tumulto, hasta se perdió la tablilla cuneiforme en el umbral de palacio.

Un eclipse total de sol no deja a nadie indiferente, aunque hoy se haya convertido en mero acontecimiento turístico. En marzo de 2006 se juntaban más de 20.000 personas en el Sahara para vivir cómo la Luna se colocaba delante del Sol, la luz se iba difuminando paulatinamente, hacía cada vez más frío y la oscuridad aumentaba hasta permitir distinguir las estrellas en pleno día. Estas grandes alteraciones celestes desencadenaban miedos existenciales en las culturas orientales de la Edad del Bronce tardía. El orden del mundo parecía quebrado.

Por supuesto, nunca sabremos si la escena descrita sucedió realmente, pero muchos datos apuntan en esa dirección, en opinión de Manfried Dietrich y Oswald Loretz, de la Universidad de Münster. Estos dos investigadores publicaron hace tres años una nueva transcripción y traducción del mensaje cuneiforme, que desde entonces es motivo de discusión entre los expertos. Unidas a las recientes excavaciones en el entorno de la capital del reino, como las de Gibala (hoy, Tell Tweini), arrojan nueva luz sobre la historia del Levante durante la Edad del Bronce tardía (hacia 1500-1200 a.C.).

Claude Schaeffer descubrió entre los escombros del palacio la tablilla de arcilla, catalogada como KTU 1.78, en 1948. Pero la primera lectura del texto de seis líneas, realizada por Charles Virolleaud, resultó extraordinariamente complicada, pues el autor alisó una tablilla ya utilizada y escribió encima. Lo único claro era que trataba de un suceso astronómico.

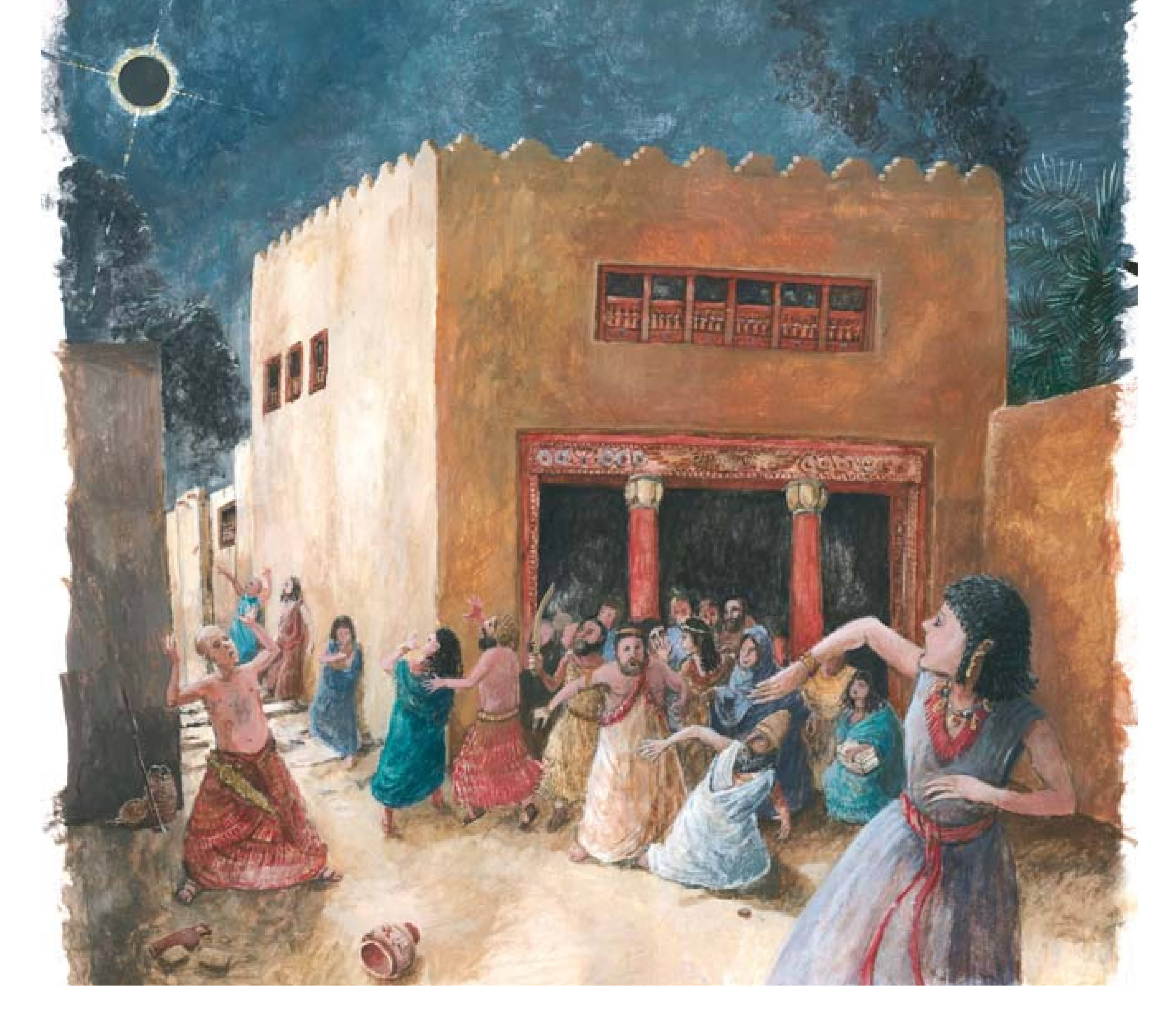
En 1970, F. Richard Stephenson, experto en astronomía histórica de la Universidad de Newcastle upon Tyne, y John F. A. Sawyer, de la Universidad de Sheffield, propusieron que la tablilla escrita era la descripción conocida más antigua de un eclipse total de Sol, al que pusieron la fecha del 3 de mayo de 1375 a.C. Más tarde, Teije de Jong y Wilfred H. van Soldt situaron el suceso en el 5 de marzo de 1223 a.C.

¿Marte o la Luna?

Dennis Pardee y Noel M. Swerdlow, ambos de la Universidad de Chicago, publicaron en 1993 que el texto no se refiere en modo alguno a un eclipse de Sol, sino a una coyuntura singular de Marte: este planeta habría aparecido en el

CONCEPTOS BASICOS

- Ugarit fue una metrópoli comercial inserta en el imperio hitita, en la costa de la actual Siria.
- Una tablilla cuneiforme encontrada en la entrada del palacio de la ciudad describe un eclipse de sol, al que considera de mal agüero. Un nuevo estudio del objeto data ese eclipse en 1192 a.C. El mal augurio se cumplió: la destrucción de Ugarit debió de producirse alrededor de 1190 a. C.
- Fueron los "pueblos del mar", aún hoy en día mal identificados, los que arrasaron para siempre Ugarit, en una de las múltiples devastaciones que, al parecer, abocaron al Mediterráneo oriental a la llamada "edad oscura" de finales del segundo milenio antes de Cristo.



mes Iyyar, después de la luna nueva, seis veces al atardecer, cuando el Sol aún estaba visible; entre 1400 y 1200 a.C., habría ocurrido tal cosa al menos cinco veces, pero no es posible fijar una fecha.

Dietrich y Loretz han vuelto a estudiar la KTU 1.78, han aclarado algunas cuestiones acerca de la interpretación de los signos y han reconstruido la situación que ahí se describe a partir de la nueva traducción y de elementos de juicio significativos, como el lugar del hallazgo (en la entrada del palacio y no en un archivo, donde sería de esperar) y las características de la escritura. A la vista de los datos astronómicos, dataron el eclipse el 21 de enero de 1192 a.C. Ese día, según los cálculos de los arqueoastrónomos, tuvo lugar un eclipse de Sol del 94 por ciento entre las 11.45 y las 14.45 en la costa del Levante del Mediterráneo. Este dato encaja muy bien en el contexto histórico y con los hallazgos arqueológicos: Ugarit fue destruida por los invasores alrededor del año 1190 a.C. Pocas veces habrán coincidido con tanto dramatismo un augurio funesto y una crisis real.

"¡Salud! ¡Que los dioses tengan a bien protegerte! Escribes que se han avistado barcos enemigos en alta mar. Si de verdad se han visto barcos, ¡fortalécete cuanto puedas! Ahora, tus soldados y carros de guerra, ¿dónde se encuentran? Algún enemigo te va a atacar por el oeste. Rodea de murallas tus ciudades. Mete dentro soldados y carros de guerra. Espera al enemigo, así serás fuerte."

El rey de Alăsia (la actual Chipre), o el de Karkemiš (en la actual frontera de Turquía y Siria), envió este mensaje al rey Ammurapi (1215 hasta alrededor de 1190 a.C.) de Ugarit, como respuesta a un aviso de presencia de una flota enemiga. La tablilla cuneiforme se sitúa, pues, también en una época alrededor de 1200 a.C., cuando hordas enemigas cayeron sobre las ricas tierras del Mediterráneo oriental y sembraron miedo y horror.

Gaston Maspero (1846-1916) acuñó el concepto de "pueblos del mar". Poderosos imperios, como el de los hititas, desaparecieron del mapa ante su embestida, al igual que numerosas casas reales del Levante. A duras penas pudo el faraón Ramsés III rechazar, hacia el

1. EL PANICO SE APODERO DE LAS CALLES de la capital de Ugarit cuando el 21 de enero de 1192 a.C. el Sol se eclipsó. ¿Qué desgracia enviarían los dioses, precisamente ahora que guerreros extranjeros devastaban las costas del Mediterráneo oriental? Que una escena como la aquí representada pudo suceder lo deducen Manfred Dietrich y Oswald Loretz de una tablilla de arcilla que se encontró en la entrada de palacio.

JORIS SNAET/*Spektrum der Wissenschaft*

2. EN EL CONCIERTO DE LOS REINOS DE LA ANTIGUEDAD, Ugarit desempeñó un importante papel de metrópoli comercial. Fue cabeza de puente entre Oriente y el Egeo.

EMDE-GRAFIK/*Spektrum der Wissenschaft*

año 1177 a.C., una invasión. Durante mucho tiempo se consideró también a los "pueblos del mar" como la causa del hundimiento simultáneo de los estados-palacio micénicos de la tierra firme griega.

En una carta al rey de Alāsia, Ammurapi se quejaba de no haber sido avisado a tiempo: "Los barcos del enemigo han llegado. Ha incendiado mis ciudades, ha traído muchas desgracias [...] Si vuelven a aparecer barcos enemigos, infórmame, para que lo sepa". Pero la propia Chipre fue atacada. Sigue siendo confuso quiénes eran en realidad estos pueblos del mar. Seguramente, no se trataba de migraciones de pueblos a la mayor escala, sino de oleadas atacantes de dimensión sólo regional, ejecutadas durante decenios, que tenían su origen en el sur de Asia Menor y en el Egeo. Algunos pueblos dejaban su tierra y buscaban la prosperidad fuera, por crisis políticas o económicas, por adversidades climáticas, por hambrunas u otras causas más apremiantes. Entre estos pueblos se encontraban, con mucha probabilidad, los filisteos, que más tarde se asentaron en Palestina occidental.

Ugarit también fue una víctima de este proceso: el mal augurio del eclipse de Sol se habría de cumplir. No se presentaron demonios, pero el exterminio del floreciente emporio comercial no debió de ser menos horrible que si se hubieran abierto las puertas del infierno. De la metrópoli y ciudades de su entorno sólo quedan ruinas.

Bajo la responsabilidad del arqueólogo francés Claude Schaeffer, se iniciaron en 1929 las excavaciones de Ugarit; en nuestros días ha estado trabajando allí un equipo sirio-francés, bajo la dirección de Bassam Jamous, director general de Antigüedades y Museos de Siria, e Yves Calvet, del Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNRS) francés. Se ha explorado gran parte de los edificios de la ciudad. Algunos hallazgos atestiguan que Ugarit debió de ser, ya en la primera mitad del segundo milenio a.C., una metrópoli importante, pero estos estratos antiguos hoy están enterrados en gran parte bajo ruinas; la Ugarit de la Edad del Bronce tardía se alzaba hacia 1200 a.C. sobre los escombros de los estratos del asentamiento más antiguo.

Pérgolas y patios sombreados

Una fuerte muralla de bloques de piedra protegía a los habitantes. Por desgracia, gran parte de esta muralla está devastada por la erosión y la reutilización de las piedras. Pero se conservan restos de un torreón de la puerta de entrada muy fortificado. Justo al lado había una poterna, un túnel de unos veinte metros que atravesaba la fortificación, para poner en apuros al enemigo con un ataque por sorpresa. Ese tipo de túneles fue una invención de los hititas. ¿Acaso habían aprendido los constructores de Ugarit en la corte del magno monarca en Hattuscha cómo construirlas? Los intercambios de expertos e ideas habrían correspondido plenamente a los usos diplomáticos habituales en aquella época. El pequeño reino de Ugarit (*véase la figura 2*) era, al final de la Edad del Bronce, un estado vasallo de los hititas.

Protegidos por sus potentes fortificaciones, unos 10.000 habitantes vivían en una superficie de 600 × 500 metros. Muchas casas evidencian un alto nivel de vida: los espacios destinados al trabajo y los negocios se ubicaban en un patio umbrío; las habitaciones se encontraban en la planta superior; en el terrado, pérgolas con parras ofrecían un espacio para la distensión.

Una de las villas lujosas es la "casa de Urtenu" (puesta al descubierto hace unos pocos años), un comerciante y funcionario del estado con buenos contactos con la familia real. Jarrones de alabastro, cerámicas de importación chipriotas y micénicas, exquisitamente pintadas, dan cuenta de una amplia red comercial en la Edad del Bronce tardía.

Pero incluso este lujo palidece ante el del palacio, que ocupa una superficie de casi 10.000 metros cuadrados y contaba con varios pisos. Frescos patios, con jardines y fuentes de piedra, y galerías sombreadas en las plantas superiores protegían del calor abrasador del verano. Como era habitual en las residencias orientales de la antigüedad, se reservaban varias partes del edificio a la gestión. Otras se destinaban a usos comerciales. Para acceder a la amplia sala del trono, las delegaciones extranjeras atravesaban un atrio con columnas.

Los autores

Joachim Bretschneider enseña arqueología del Oriente antiguo en la Universidad Católica de Lovaina. **Klaus-Dieter Linsmeier** es redactor de *Spektrum der Wissenschaft*.

Sobre los pormenores políticos y mercantiles en aquel mundo informan, entre otras fuentes, los textos cuneiformes del archivo de palacio y del archivo hallado en la villa Urtenu. Diplomáticos y comerciantes de los cuatro puntos cardinales acudían a Ugarit: de los países del sur, Caná, Palestina, Amurru, Egipto y Nubia; de Asur y Subartu, en el oeste; de Mikis, Hatti y Mitanni, en el norte; de Alăsia, Creta y hasta de Cerdeña, en el oeste. Se comerciaba con el cobre de Chipre, con aceite y grano del Levante, con madera de cedro del Líbano, que antaño decoraba los techos de los suntuosos palacios. En las excavaciones aparecieron lujosos objetos de oro, marfil, alabastro y cerámica.

Funcionarios, sacerdotes, sabios, diplomáticos y comerciantes dejaron testimonios escritos en ocho lenguas. Se redactaron centenares de textos en el idioma propio de Ugarit, precananítico, pero se solía utilizar el babilonio, que era la lengua diplomática en aquel tiempo. Se han encontrado, además, inscripciones jeroglíficas egipcias e hitito-luvitas, y tablillas de arcilla con la escritura minoico-chipriota, aún no descifradas. Los escribas de Ugarit llegaron incluso a desarrollar un alfabeto propio a partir de treinta signos cuneiformes (*véase el recuadro* "La escritura cuneiforme de Ugarit"). Más tarde, los fenicios retomaron la idea y crearon un alfabeto que constituiría la base de la escritura latina: *ex oriente lux.*

Los ugaritólogos no sólo descifran documentos administrativos y correos diplomáticos; muchas de estas tablillas aclaran también las creencias del Levante del Mediterráneo en aquella época; hallazgos comparables son muy raros. Así, por ejemplo, un texto ritual refiere que en el sepelio de un rey se conjuraba a sus predecesores. En siete etapas, el monarca fallecido debía descender acompañado del dios Sol a su mausoleo, para entrar allí en el averno. Los hallazgos arqueológicos en Ugarit y Gibala confirman esta descripción: como era habitual en aquella zona, se enterraba a los muertos en sepulcros que se encontraban debajo de las

LA ESCRITURA CUNEIFORME DE UGARIT

Muchos pueblos del antiguo Oriente emplearon la escritura cuneiforme desarrollada por los sumerios hace unos 5000 años. Constaba de varios cientos de signos; por eso requería escribas expertos. Mas en la metrópoli mercantil de Ugarit lograron una simplificación casi revolucionaria.

A comienzos del segundo milenio a.C. había en Wadi el-Hol, cerca de Tebas (Egipto), y en el Sinaí un arcaico alfabeto semítico, creado a partir de los jeroglíficos egipcios, como se puede deducir de las inscripciones encontradas. Cananeos que vivían en el país de los faraones utilizaban sus elementos básicos para representar las palabras extranjeras. Los signos sólo representaban las consonantes; por ejemplo, la imagen de una casa correspondía al sonido 'b', pues ésta es la primera letra de 'bet', la palabra semítica que significa casa. Esta escritura consonántica se extendió por las ciudades mercantiles importantes del Levante hacia Palestina, Líbano y Siria occidental.

En la Ugarit de la Edad del Bronce tardía se desarrolló después, bajo el influjo de la cultura cuneiforme mesopotámica, el alfabeto cuneiforme más antiguo. La mayoría de los textos redactados en ugarítico están escritos en un sistema de treinta signos, que había que leer de izquierda a derecha. Pero había también un alfabeto de 22 signos, con un sentido inverso de lectura. La escritura era, pues, una cuestión algo menos exclusiva; hasta comerciantes y contables se beneficiaban de ella. En el siglo XI a.C. se desarrolló la escritura fenicia a partir del alfabeto cananeo antiguo, y se extendió, en el curso del primer milenio, muy al oeste.

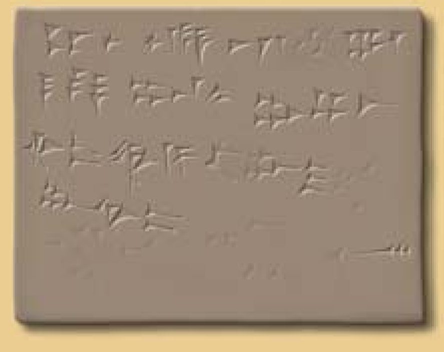
Entre las obras literarias más conocidas y más significativas del Oriente antiguo se cuentan las seis tablillas de Ugarit escritas en alfabeto cuneiforme con el mito de Baal. Relatan la historia de la vida de Baal, dios del tiempo meteorológico (uno de los principales dioses del entorno cultural siro-mesopotámico), responsable de la vegetación y de la fertilidad de los campos durante el período de lluvias.

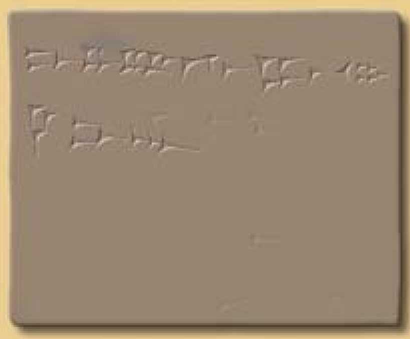
"Yo soy el que domina, rey de los dioses, quien engorda a dioses y hombres, quien sacia a las multitudes de la Tierra."

Junto a Baal gobernaba su hermana Anat, cruel diosa de la guerra. "¡Mira! Anat lucha en la planicie, derriba en las dos ciudades. Golpea al pueblo de la costa, aniquila a los hombres por donde sale el Sol [...] Cuelga cabezas de su espalda, ata manos a su cinto. Sumerge sus rodillas en la sangre de los fuertes, los muslos en los despojos de los guerreros."

Diversos filólogos ven aquí una reminiscencia de ofrendas sangrientas o de luchas rituales en la fiesta de año nuevo; incluso se ha conjeturado que se sacrificase a prisioneros de guerra ante la estatua de la diosa Anat. Al lado del dios del tiempo meteorológico, representa también, a su vez, el amor y la fertilidad.

"Un mensaje del todopoderoso Baal, una palabra del más poderoso de los héroes: ¡Dale a la tierra bizcocho, pon en el suelo frutos de amor! ¡Derrama paz dentro de la tierra, plenitud de amor dentro de los campos!"





EMDE-GRAFIK/*Spektrum der Wissenschaft*

LOS ESCRIBAS DE UGARIT desarrollaron un alfabeto cuneiforme muy eficaz. El aviso del sacerdote está redactado también en esta escritura.

3. UGARIT ESTA EN LA FERTIL COSTA DE SIRIA. Aquí se ve sólo una cuarta parte de su superficie, en concreto el palacio (*flecha roja*) representado en la figura 1. El puerto antiguo estaba protegido en una ensenada (*flecha amarilla*).

ANWAR ABDEL GHAFOUR, CORTESIA DEL DIRECTOR GENERAL DE ANTIGÜEDADES Y MUSEOS, DR. BASSAM JAMOUS, DAMASCO, SIRIA, 2006. EN: AUX ORIGINES DE L'ALPHABET - LE ROYAUME OUGARIT, 2004, PAG. 27/*Spektrum der Wissenschaft*

viviendas; los reyes eran inhumados bajo el palacio. Esta proximidad espacial debía, presumiblemente, garantizar la continuidad de familias y dinastías. Los soberanos legitimaban así poder y bienes.

Los biblistas tienen también interés en los textos religiosos de Ugarit, pues constituyen una de las fuentes más importantes del entorno del Antiguo Testamento. Por ejemplo, se menciona varias veces a la diosa Aschera, esposa del dios principal El, como también a Baal, dios del tiempo meteorológico, contra cuya adoración clamó el profeta Elías.

Está, pues, claro que Ugarit no era una ciudad cualquiera de la costa, sino un emporio importante del comercio internacional y una metrópoli multicultural. En su apogeo, el rey Ammurapi gozaba de tal autonomía, que osó acercarse al imperio de los faraones. Aunque vasallo del gran rey de los hititas, Ammurapi encargó a canteros egipcios una estatua del faraón Merneptah (1213-1203) para colocarla en el templo de Baal de su ciudad; esto, al menos, narra una carta del archivo Urtenu, traducida en 1994; por lo demás, informa sobre un suministro marítimo extraordinariamente copioso de objetos de lujo de Egipto. En otro escrito, Ammurapi llega incluso a llamar al faraón "sol, gran rey, rey de reyes".

A merced de los enemigos

Pero quizás el faraón no reaccionó de la forma deseada, o el rey de Hattuša, la capital de los hititas, pudo hacer entrar en razón a sus díscolos vasallos. O a lo mejor la oferta de Ugarit fue sólo una expresión, difícil de interpretar hoy, de una táctica diplomática. Sea como fuere, en la carta al rey de Chipre ya citada, Ammurapi no sólo se quejaba de que se tardase en avisarle de la llegada de una flota invasora: "¿No sabe mi padre [es una fórmula de respeto] que todas mis tropas [o las tropas de mi padre] están en Hatti [el país de los hititas] y mis barcos en Lukka [en Licia, en el sur de la actual Turquía]?". Hay una misiva, de remitente no identificado, que con ese trasfondo se puede interpretar como una carta de la corte hitita a Ammurapi: Ugarit debía apresurarse en ayudar con tropas a los hititas. Sin sus fuerzas armadas, eran presa fácil de los invasores.

Todos estos fragmentos documentan la situación apurada del país, pero no contienen ningún indicio de las fechas. Un documento cuneiforme del general egipcio Beya a Ammurapi permite, por lo menos, fijar unos límites: este Beya es muy probablemente el canciller Bay, que ocupó tal puesto de 1194 a 1186 a.C. Ugarit debió de ser destruida durante su desempeño del cargo. La reciente datación de la tablilla cuneiforme KTU 1.78 en 1192 a.C. acota aún más el intervalo temporal.

Que Ammurapi comunicara a Chipre que el enemigo había incendiado sus ciudades y ocasionado enormes desgracias podría querer decir que los invasores atacaron primero los alrededores antes de abordar la metrópoli, muy fortificada. Al cabo de poco, la capital misma fue arrasada y no quedó piedra sobre piedra. Sólo así pueden explicarse los estratos (de hasta

4. EN GIBALA LA SUERTE LES FUE FAVORABLE A LOS ARQUEOLOGOS: debajo de una vivienda, una cripta cerrada con losas estaba intacta y albergaba más de treinta muertos (*izquierda*). Por los agujeros de las lápidas se hacían, quizás, ofrendas líquidas. La estructura redonda junto a la entrada de la cripta servía también, presumiblemente, para las ofrendas. De la época de los fenicios, alrededor de 900 a.C., sólo se han descubierto hasta ahora tumbas aisladas, que ya no estaban bajo las viviendas (*abajo*).

JOACHIM BRETSCHNEIDER/*Spektrum der Wissenschaft*

dos metros de grosor) de ruinas y cenizas en el palacio y en la residencia cercana de Ras Ibn-Hani. Los arqueólogos hallaron también en la ciudad numerosas puntas de lanza, indicio verosímil de operaciones militares. Pero, sorprendentemente, no encontraron víctimas. La mayoría de los habitantes bien pudieron huir a tiempo hacia el interior. Antes de huir, algunos enterraron figuras de bronce y oro, para que no cayeran en manos de los enemigos. Pero, ¿por qué no volvieron nunca los propietarios a recuperar sus bienes?

La respuesta a ésta y otras preguntas esperan obtenerla los arqueólogos con nuevas excavaciones en los suburbios de la metrópoli. Durante años, un equipo belga-sirio, bajo la responsabilidad de Michel Al-Maqdissi, de la Dirección General de Antigüedades y Museos de Siria, y de Karel Van Lerberghe, de la Universidad Católica de Lovaina, ha venido investigando en Tell Tweini, cerca de la ciudad actual de Jabla. Los arqueólogos pusieron al descubierto allí la antigua Gibala, una ciudad en la frontera sur del reino de Ugarit, cuya superficie se extendía entonces 350 × 250 metros. Gibala fue también destruida alrededor de 1200 a.C., presumiblemente antes que la capital.

Sin embargo, el equipo de los directores de la excavación, Massoud Badawi y Joachim Bretschneider, hizo un descubrimiento sorprendente: inmediatamente encima del estrato del asentamiento de las casas saqueadas dieron con restos de construcciones nuevas. ¿Intentaron los supervivientes de Gibala comenzar modestamente de nuevo? ¿Decidieron los conquistadores ocupar el país? Tampoco

está claro durante cuánto tiempo se habitaron esas casas.

Pasaron dos siglos, “la edad oscura” en la bibliografía especializada. El tiempo de los grandes palacios en el Mediterráneo oriental había pasado. Parecía que nadie sabía escribir. Pero a comienzos del primer milenio a.C. florecieron en Asia Menor las ciudades griegas, se fortaleció el imperio asirio y los fenicios se convirtieron en una potencia comercial. Estos últimos fueron, ciertamente, los nuevos señores de Gibala. Investigaciones geomagnéticas, excavaciones e inspecciones de superficie muestran que allí volvió a prosperar una ciudad que vivía del comercio. Sólo a mitad del primer milenio a.C. se abandonó definitivamente el lugar porque el puerto se colmató con arena.

Por el contrario, a Ugarit, la otrora ostentosa metrópoli, no le fue concedido ni siquiera un renacimiento tan pasajero. Si prescindimos de una aldea en el siglo V a.C., el lugar no fue habitado durante milenios.

Bibliografía complementaria

LA CITE D’OUGARIT. Marguerite Yon. Editions recherche sur les civilisations; París, 1997.

DER UNTERGANG VON UGARIT AM 21. JANUAR 1192 V. CHR. Manfried Dietrich y Oswald Loretz en *Ugarit-Forschungen, Internationales Jahrbuch für die Altertumskunde Syrien-Palästinas*, vol. 34/2002, pág. 53. Ugarit Verlag; Münster, 2003.

LE ROYAUME OUGARIT. AUX ORIGINES DE L’ALPHABET. Catálogo de la exposición del Museo de Bellas Artes, Lyon. Somogy éditions d’art; París, 2004.

La domesticación del

gato

La genética y la arqueología nos revelan que los gatos monteses se convirtieron en domésticos antes, y en un lugar distinto, de lo que se creía

Carlos A. Driscoll, Juliet Clutton-Brock, Andrew C. Kitchener y Stephen J. O'Brien

Retraído y afectuoso, sereno y salvaje, cautivador y exasperante. A un mismo tiempo. Mas, pese a su naturaleza veleidosa, el gato doméstico es el animal de compañía más popular del mundo. Un tercio de los hogares estadounidenses tienen miembros felinos; más de 600 millones de gatos viven entre humanos en todo el planeta. Sin embargo, por familiar que nos sea su presencia, sus orígenes han permanecido ocultos hasta ahora. Mientras que otros animales otrora salvajes fueron domesticados por su leche, carne, lana o por el trabajo servil, los gatos no aportan nada al progreso humano, ni en la alimentación ni en el trabajo. ¿Cómo llegaron, pues, a formar parte de nuestros hogares?

Se hallaba muy afianzada la idea de que los egipcios de la antigüedad clásica fueron los primeros en incorporarlos entre sus animales domésticos, hace unos 3600 años. Pero los descubrimientos genéticos y arqueológicos cosechados a lo largo de los últimos cinco años han refutado esa hipótesis: los resultados ofrecen nuevas luces para reinterpretar el origen del gato doméstico y la evolución de su relación con los humanos.

La cuna del gato

¿Dónde surgieron los gatos domésticos? Cuestión ardua, por varias razones. Aunque se sospechaba que todas las variedades descendían de la misma especie de felino (*Felis silvestris*, el gato montés), no había prueba de ello. Además, la especie no se halla confinada en un pequeño rincón del globo; sus poblaciones se distribuyen por todo el Viejo Mundo: de Escocia a Sudáfrica y de España a Mongolia. Hasta hace poco, no había forma de determinar cuál de esas poblaciones de gato salvaje dio origen a la especie doméstica.

Una alternativa a la hipótesis de los orígenes egipcios proponía que la domesticación del gato tuvo lugar en varias localidades; cada domesticación habría producido una raza distinta. El asunto quedaba enmascarado por el hecho de que los miembros de estos grupos de gatos salvajes son difíciles de distinguir, entre sí y de los gatos domésticos cimarrones de pelaje atigrado con rayas verticales ("mackerel-tabby"); muestran todos el mismo patrón de pelaje con listas curvadas y se entrecruzan libremente, lo que acaba de difuminar los límites de las poblaciones.

CONCEPTOS BASICOS

- A diferencia de otros animales domésticos, el gato no aporta apenas nada a la supervivencia humana. ¿Cómo y por qué se les introdujo en nuestra vida?
- Los expertos pensaban que los egipcios fueron los primeros en domesticar al gato, hace unos 3600 años.
- Pero el progreso de la genética y de la arqueología nos revela que la domesticación del gato empezó en el Creciente Fértil, hace unos 10.000 años, cuando la agricultura empezaba a abrirse camino.
- Los gatos habrían empezado a convivir con los humanos para alimentarse de los ratones y los restos de comida que encontraban en sus poblados.

“Matará ratones y se portará bien con los Bebés cuando esté en casa, siempre que no le tiren del rabo demasiado fuerte. Pero cuando lo haya hecho, y en sus ratos libres, y cuando la Luna se levante y llegue la noche, será el Gato que camina solo y no le importará estar aquí o allá. Después se irá a los Bosques Salvajes y Húmedos o subirá a los Arboles Salvajes y Húmedos o a los Techos Salvajes y Húmedos, meneando su salvaje rabo y andando con su salvaje soledad.”

—Rudyard Kipling, “El gato que caminaba solo”

En el año 2000, uno de los autores (Driscoll) se dispuso a abordar la cuestión del origen geográfico del gato doméstico mediante el acopio de muestras de ADN de 979 gatos monteses y gatos domésticos de Africa austral, Azerbaiján, Kazajstán, Mongolia y Oriente Medio. Puesto que los gatos monteses defienden el mismo territorio de por vida, cabía esperar que la composición genética de los grupos de gatos monteses variaría en función de la geografía y permanecería estable en el tiempo, tal como ha ocurrido con muchas otras especies de felinos. Si lograba distinguir entre sí (sobre la base de su ADN) los grupos regionales indígenas y si el ADN de los gatos domésticos guardaba mayor semejanza con una de las poblaciones salvajes, entonces podría localizarse el origen de la domesticación [*véase* “Evolución de los felinos”, por Stephen J. O’Brien y Warren E. Jonson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre 2007].

En el análisis genético, publicado en 2007, Driscoll, otro de los autores (O’Brien) y sus colaboradores se concentraron en dos tipos de ADN que suelen examinarse para diferenciar subgrupos de especies de mamíferos: el ADN de las mitocondrias, que se hereda exclusivamente de la madre, y secuencias repetidas y cortas de ADN del núcleo (microsatélites). Mediante algoritmos informáticos, determinaron, a partir de la rúbrica genética, la genealogía de cada uno de los 979 individuos muestreados. Midieron el grado de semejanza entre el ADN de cada gato y el de todos los demás. Agruparon los animales que poseían un ADN similar. Se preguntaron luego si la mayoría de los animales de un grupo vivían en la misma región.

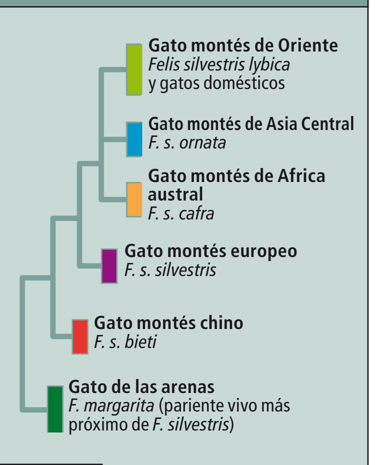
Los resultados revelaron cinco grupos genéticos, o estirpes, de gatos monteses. Cuatro de ellas se correspondían con cuatro de las subespecies de gato montés conocidas y moraban en lugares específicos: *Felis silvestris silvestris* en Europa, *F. s. bieti* en China, *F. s. ornata* en Asia central y *F. s. cafra* en Africa austral. La quinta estirpe, en cambio, incluía no sólo la quinta subespecie conocida de gato montés (*F. s. lybica*, de Oriente Medio), sino también los cientos de gatos domésticos que fueron muestreados; entre ellos, felinos de pura raza y de razas mezcladas de los EE.UU., Gran Bretaña y Japón.

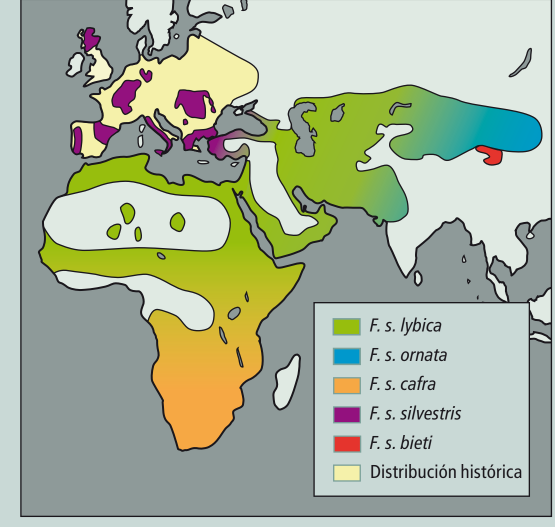
Los gatos monteses *F. s. lybica* procedentes de desiertos remotos de Israel, los Emiratos Arabes Unidos y Arabia Saudita eran prácticamente indistinguibles, desde el punto de vista genético, de los gatos domésticos. El que éstos se agruparan, de entre todos los gatos monteses, sólo con *F. s. lybica*, significaba que los gatos domésticos surgieron en una región, Oriente Medio, y no en otros lugares de morada habitual de los gatos monteses.

Tras descubrir dónde comenzó la domesticación del gato, el siguiente paso era averiguar cuándo. Los genéticos suelen estimar el momento en que se produjo un acontecimiento mediante el estudio de la cantidad de mutaciones genéticas aleatorias que se acumulan, a una tasa constante, en el transcurso del tiempo.

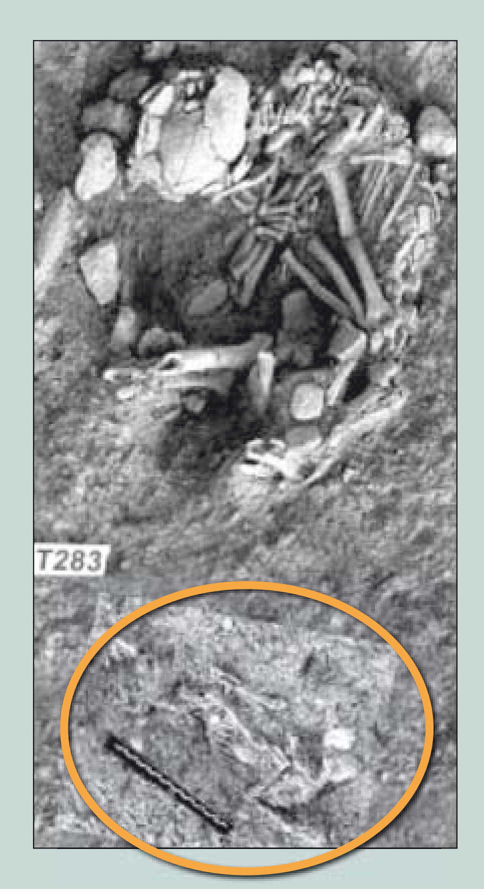
EL ANTEPASADO DEL GATO DOMESTICO

Los investigadores examinaron el ADN de un millar de gatos monteses y gatos domésticos del Viejo Mundo, para determinar qué subespecie del gato montés (*Felis silvestris*) dio origen al gato doméstico. Hallaron que el ADN se agrupaba, según la semejanza de las secuencias, en cinco estirpes; los gatos monteses de cada grupo procedían de la misma región (*mapa*). Los gatos domésticos, en cambio, se agrupaban sólo con el gato montés de Oriente Medio (*F. silvestris lybica*). Así pues, todos los gatos domésticos descienden de *F. s. lybica* (*árbol genealógico*).





JANE BURTON *Getty Images* (*páginas anteriores*); TOM BRAKEFILED *Getty Images* (*esta página*); JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)



1. DOMESTICACION TEMPRANA. Tradicionalmente se ha atribuido a los egipcios de la antigüedad clásica la domesticación del gato, hace unos 3600 años. Pero en 2004, los arqueólogos descubrieron en la isla de Chipre una sepultura de 9500 años de antigüedad que contenía un humano adulto y un gato (*círculo naranja*). Puesto que los gatos no son nativos de Chipre, debieron llegar allí por mar junto a los humanos, probablemente desde el vecino Levante mediterráneo. El hallazgo sugiere que los pobladores de Oriente Medio empezaron a tener gatos como animales domésticos mucho antes que los egipcios.

FUENTE: "EARLY TAMING OF THE CAT IN CYPRUS", POR J.-D. VIGNE, J. GUILAINE, K. DEBUE, L. HAYE Y P. GÉRARD, EN *SCIENCE*, VOL. 304; ABRIL DE 2004

Pero el tictac de este reloj molecular procede con una cadencia demasiado lenta para datar episodios tan recientes como los ocurridos en los últimos 10.000 años (el intervalo probable de la domesticación del gato). Para aproximarnos a esa época hemos de acudir al registro arqueológico. Un descubrimiento reciente ha arrojado luz sobre esta cuestión.

En 2004, Jean-Denis Vigne, del Museo Nacional de Historia Natural de París, y sus colaboradores informaron haber exhumado la prueba más antigua de la domesticación del gato. El descubrimiento se hizo en la isla de Chipre, donde hace 9500 años un humano adulto de género desconocido fue enterrado en una tumba somera. El cuerpo estaba acompañado por objetos de índole varia: útiles líticos, un burujo de óxido de hierro, un puñado de conchas marinas y, en su propia tumba minúscula, a sólo 40 centímetros de distancia, un gato de ocho meses de edad, con el cuerpo orientado hacia el oeste, en la misma dirección que el humano.

Puesto que los gatos no son nativos de la mayoría de las islas mediterráneas, los humanos tuvieron que haberlos llevado allí en barca, probablemente desde la vecina costa del Levante. El transporte de gatos a la isla y el enterramiento de un humano con un gato indican que la gente tenía ya una relación especial, intencional, con gatos hace casi 10.000 años en Oriente Próximo. Este escenario concuerda con el origen geográfico al que habíamos llegado mediante nuestro análisis genético. Parece, pues, que se estaba domesticando el gato por la época en que la humanidad establecía los primeros asentamientos en el Creciente Fértil.

¿Un juego del gato y el ratón?

Una vez establecida la geografía y la edad aproximada del inicio de la domesticación del gato, podíamos volver a plantear la vieja cuestión sobre la causa de la relación especial desarrollada entre gatos y humanos. Los felinos en general son malos candidatos para la domesticación. Los antepasados de la mayoría de los animales domésticos vivían en rebaños o manadas con jerarquías de dominancia claras. (De forma inconsciente, los humanos sacaron partido de dicha estructura al suplantar al individuo alfa, con lo que facilitaron el control de grupos enteros.) Esos animales grupales ya estaban acostumbrados a vivir juntos, por lo que, al haber comida abundante y refugio, no les costó adaptarse al confinamiento.

Los felinos, en cambio, son cazadores solitarios que defienden ferozmente su territorio frente a otros felinos del mismo sexo (los leones que viven en manadas son la excepción). Además, mientras que la mayoría de los animales domésticos comen alimentos vegetales fáciles de conseguir, los gatos son carnívoros obligados, es decir, que tienen una capacidad limitada para digerir nada que no sea carne, un manjar mucho más raro. De hecho, han perdido la capacidad de saborear los glúcidos. En cuanto a la utilidad para los humanos, digamos simplemente que los gatos no se dejan adiestrar.

De tales atributos característicos se infiere la posible explicación sobre el motivo de su domesticación. Si otros fueron reclutados por el hombre de su estado natural para ahormarlos en tareas específicas, lo más probable es que los gatos "eligieran" vivir entre los humanos debido a las ventajas que ello les reportaba.

Los primeros establecimientos humanos en el Creciente Fértil hace entre 9000 y 10.000 años, durante el Neolítico, crearon un ambiente nuevo para aquellos animales salvajes que fueran lo bastante flexibles e inquisitivos (o asustadizos y hambrientos) para explotarlo. El ratón casero (*Mus musculus domesticus*) era uno de ellos. Los arqueólogos han encontrado restos del roedor, que se originó en el subcontinente Indio, en los primeros almacenes de grano de Israel, que datan de hace unos 10.000 años. Los ratones caseros no podían competir con los ratones de campo, pero medraron tras instalarse en las casas y los silos.

Muy probablemente, esos ratones caseros atrajeron a los gatos. Y los montones de basura que se acumulaban en las afueras del pueblo debieron ser también de interés, pues propor-

DE SALVAJE A MANSO

Los investigadores creen, apoyados en documentos arqueológicos e históricos, que la transformación del gato montés de Oriente Próximo en un animal doméstico ubicuo sucedió en el transcurso de miles de años.

◀ **HACE 10.500-9500 AÑOS**
Restos de ratones domésticos conservados en graneros de Israel; el origen de la agricultura y los asentamientos humanos permanentes crean oportunidades para los gatos que busquen la proximidad del hombre para cazar ratones domésticos

HACE 9500 AÑOS
Doble enterramiento, humano y felino, en la isla de Chipre; prueba más antigua de la relación entre humanos y gatos

◀ **HACE 3700 AÑOS**
Estatuilla de marfil de un gato esculpida en Israel; sugiere que los gatos eran comunes en los asentamientos humanos del Creciente Fértil

HACE 3600 AÑOS
Los artistas pintan gatos domesticados en Tebas, Egipto; pruebas más antiguas de gatos domesticados

◀ **HACE 2900 AÑOS**
Los gatos se convierten en una divinidad "oficial" en Egipto en forma de la diosa Bastet; numerosos gatos sacrificados y momificados en su ciudad sagrada indican que los egipcios criaban gatos domésticos

HACE 2300 AÑOS
Apogeo de la adoración del gato en Egipto; los gobernadores ptolemaicos mantienen normas estrictas sobre la exportación de gatos

HACE 2000 AÑOS
Restos de gatos conservados en la localidad alemana de Tofting (Schleswig) y referencias crecientes a los gatos en la literatura muestran que los gatos domésticos eran comunes en toda Europa

◀ **1350-1767** El *Tamara Maew* ("Poemas del libro de los gatos"), compuesto por monjes budistas en Tailandia, describe razas naturales indígenas, como el siamés, que surgió más por deriva genética que por intervención humana

SIGLO XIX La mayoría de las razas modernas se desarrollaron en las islas Británicas, según los escritos del artista de historia natural inglés Harrison Weir

◀ **1871** La exposición de gatos en el Palacio de Cristal londinense es la primera en incluir razas creadas por el hombre

2006 Primer gato hipoalergénico, creado por Allerca

STEPHEN DALTON *Photo Researchers, Inc.* (*ratón*); THE ISRAEL MUSEUM, JERUSALEM (*estatua*); THE BRITISH MUSEUM (*momia*); DAVE KING *Getty Images* (*siamés*); HELMI FLICK (*British Shorthair*)

cionaban durante todo el año comida a los felinos que supieran encontrarlos. Ambos tipos de recursos alimentarios habrían animado a los gatos a adaptarse a vivir entre los humanos. Para decirlo en la jerga de la biología evolutiva, la selección natural favoreció a los gatos que, por cohabitar con los humanos, tenían acceso a la basura y a los ratones.

Con el tiempo, gatos monteses que toleraban mejor la vida en ambientes dominados por humanos empezaron a proliferar en las aldeas del Creciente Fértil. La selección en este nuevo nicho se habría producido sobre todo por la mansedumbre, pero también la competencia entre gatos habría seguido ejerciendo influencia sobre su evolución, con lo que habría puesto límite a su docilidad potencial. Dado que esos gatos protodomésticos seguían ganándose su propio sustento, conservaron su agudeza para la caza y el carroñeo. Incluso en la actualidad, la mayoría de los gatos domésticos son agentes libres que sobreviven fácilmente con independencia de los humanos; prueba de ello es la plétora de gatos cimarrones que medran por ciudades, pueblos y espacios naturales de todo el mundo.

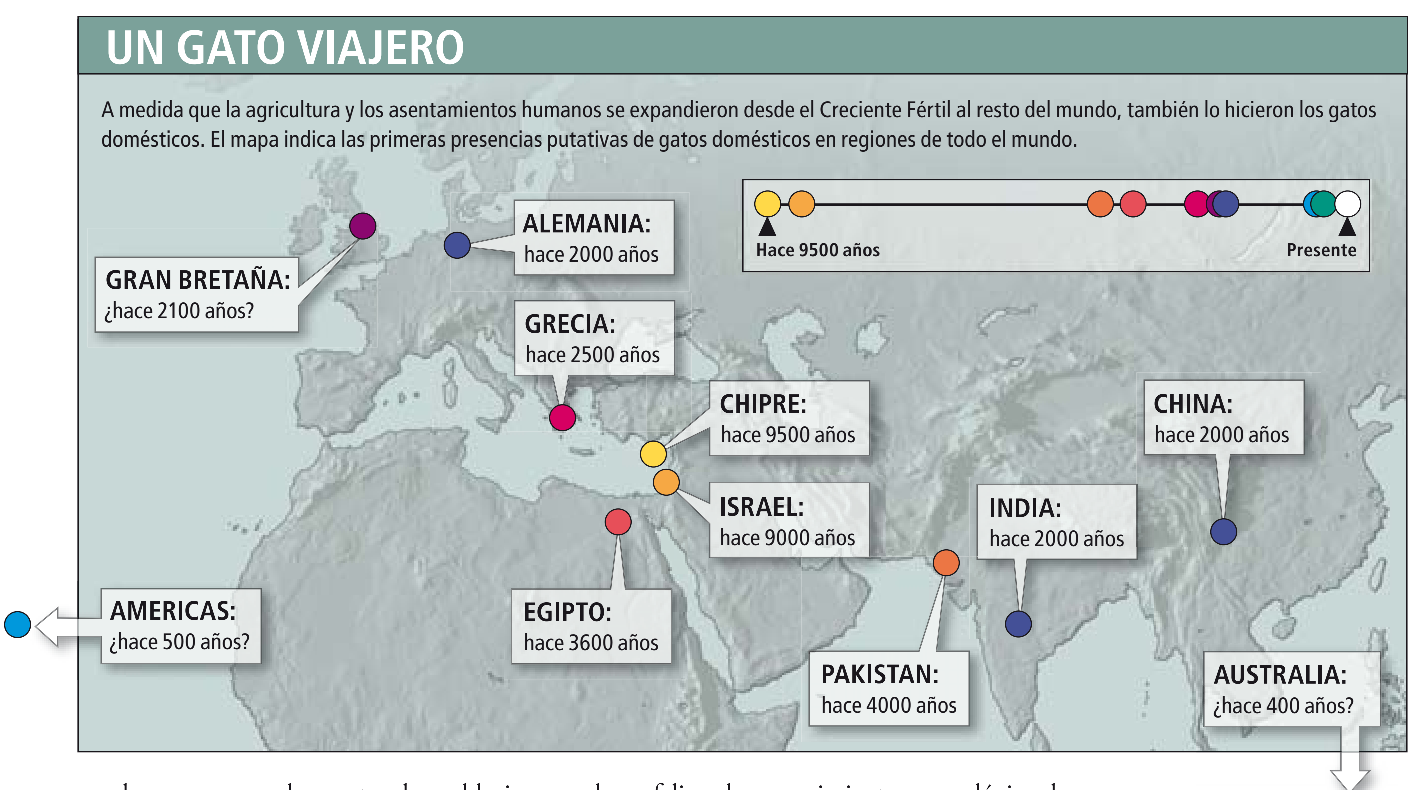
Si consideramos que los felinos pequeños causan poco daño, probablemente a la gente no le importaba su compañía; puede incluso que los humanos animaran a los gatos a permanecer cerca cuando vieron que eliminaban ratones y serpientes. Los gatos también pudieron haber tenido otro atractivo. Algunos expertos especulan que los gatos monteses poseían casualmente rasgos que podrían haberlos preadaptado a establecer una relación con los humanos. Nos referimos a los rasgos "encantadores" que despiertan en los humanos sentimientos maternales: ojos grandes, cara chata y frente alta y redondeada, entre otros. Algunas personas se habrían llevado a casa gatitos, simplemente porque los encontraban adorables; entonces los amansaron, abriéndoles las puertas del corazón humano.

¿Por qué fue *F. s. lybica* la única subespecie de gato montés que se domesticó? Pruebas aisladas sugieren que otras subespecies, como el gato montés europeo y el gato montano chino, toleran menos a las personas. Si tal es cierto, sólo ese rasgo habría bastado para descartar su adopción en los hogares humanos. En cambio, los gatos monteses de Africa austral y de Asia central, más amigables, bien pudieran haberse domesticado. Pero *F. s. lybica* tuvo la ventaja de ser el primero, en virtud de su proximidad a los primeros asentamientos.

A medida que la agricultura se expandió desde Oriente Próximo, también lo hicieron los vástagos mansos de *F. s. lybica*; ocuparon el mismo nicho en cada región donde entraban,

UN GATO VIAJERO

A medida que la agricultura y los asentamientos humanos se expandieron desde el Creciente Fértil al resto del mundo, también lo hicieron los gatos domésticos. El mapa indica las primeras presencias putativas de gatos domésticos en regiones de todo el mundo.



JEN CHRISTIANSEN

con lo que cerraron la puerta a las poblaciones locales de gatos monteses.

Si los gatos domésticos de Oriente Próximo no hubieran llegado nunca a Africa o Asia, quizá los gatos monteses indígenas de estas regiones hubieran sido atraídos a casas y aldeas conforme se desarrollaban las civilizaciones urbanas.

La deificación del gato

No sabemos cuánto tiempo llevó la transformación del gato montés de Oriente Próximo en un afectuoso compañero doméstico. Bajo condiciones controladas, los animales pueden domesticarse con prontitud. En un famoso experimento, científicos rusos que utilizaban un sistema de cría muy selectivo produjeron en sólo 40 años zorros plateados mansos a partir de animales salvajes. Pero sin puertas ni cristales en las ventanas, a los agricultores neolíticos les habría resultado imposible controlar la reproducción de los gatos, en el supuesto de que hubieran querido hacerlo. Parece razonable pensar que la ausencia de una intervención humana sobre la reproducción y la mezcla de gatos domésticos y gatos monteses se combinaron en contra de una domesticación rápida, lo que hizo que la metamorfosis perdurara miles de años.

Aunque la cronología de la domesticación del gato sigue sin conocerse con exactitud, los restos arqueológicos proporcionan atisbos del proceso. Después del hallazgo de Chipre, las pruebas más antiguas de una asociación entre humanos y gatos corresponden al diente molar de un felino de un yacimiento arqueológico de Israel, que se remonta a hace unos 9000 años, y a otro diente del Pakistán, datado en unos 4000 años de antigüedad.

Las pruebas de domesticación completa aparecen en un período posterior. Una estatuilla de marfil de un gato, de 3700 años de edad procedente de Israel, sugiere que el gato era una presencia común en las casas y aldeas de Oriente Próximo antes de su introducción en Egipto. Este escenario tiene sentido, puesto que todos los demás animales domésticos (excepto el asno) y las plantas cultivadas se introdujeron en el valle del Nilo desde el Creciente Fértil.

Pero son las pinturas egipcias del período del Reino Nuevo (la edad de oro de Egipto, que empezó hace unos 3600 años) las que proporcionan las representaciones más antiguas conocidas e inequívocas de domesticación total. Esas pinturas representan a gatos situados bajo sillas, a veces con collares o apersogados, y a menudo comiendo de cuencos o alimentándose de restos. La abundancia de estas ilustraciones significa que, por aquella época, los gatos se habían convertido en inquilinos habituales de los hogares egipcios.

Ese tipo de imágenes evocadoras abonó la hipótesis de que la cuna del gato doméstico se hallaba en Egipto. Sin embargo, incluso las más antiguas representaciones egipcias de gatos monteses son de 5000 a 6000 años más recientes que el enterramiento chipriota, de hace 9500 años. Por tanto, la cultura egipcia clásica no puede atribuirse la domesticación

Los autores

Carlos A. Driscoll es miembro de la Unidad de Investigación en Conservación de la Vida Salvaje, de la Universidad de Oxford, y del Laboratorio de Diversidad Genómica del estadounidense Instituto Nacional del Cáncer. **Juliet Clutton-Brock**, fundadora del Consejo Internacional para la Arqueozoología, es pionera en el estudio de la domesticación y los comienzos de la agricultura. **Andrew C. Kitchener** es el responsable de la conservación de mamíferos y aves en los Museos Nacionales de Escocia, donde estudia la variación geográfica y la hibridación en mamíferos y aves. **Stephen J. O'Brien** dirige el Laboratorio de Diversidad Genómica del Instituto Nacional del Cáncer. Ha estudiado la genética de guepardos, leones, orangutanes, pandas, ballenas jorobadas y del HIV. Este es su quinto artículo para *Investigación y Ciencia*.

SALVAR AL GATO MONTES ESCOCES

Al ser el representante más septentrional del gato montés europeo, el gato montés escocés vive en unas condiciones ambientales y climáticas distintas de las que experimenta ningún otro congénere. Asimismo, se halla en peligro crítico de extinción, debido al cruzamiento con gatos domésticos cimarrones. Según las últimas estimaciones, sobreviven sólo unos 400 individuos. Pero separar al felino escocés de los híbridos y de los gatos domésticos entraña dificultad, pues guardan una gran semejanza. Los autores descubrieron una rúbrica genética del gato montés escocés que permite su identificación, un hallazgo que facilitará la puesta en marcha de la protección legal de este animal.

del gato como uno de sus numerosos logros. Lo que no obsta para que desempeñara un papel fundamental a la hora de moldear la dinámica de la domesticación y de expandir los gatos por el mundo entero.

Los egipcios elevaron el amor por los gatos a un nivel nunca visto. Hace 2900 años, el gato doméstico se había convertido en la divinidad oficial de Egipto en forma de la diosa Bastet; se sacrificaban gatos domésticos, se los momificaba y se los enterraba en gran número en Bubastis, la ciudad sagrada de Bastet. Las toneladas de momias de gato allí encontradas demuestran que los egipcios no sólo cazaban poblaciones salvajes o cimarronas, sino que, por primera vez en la historia, criaban gatos domésticos.

Egipto prohibió oficialmente durante siglos la exportación de sus gatos venerados. No obstante, hace 2500 años los animales se habían abierto camino hasta Grecia, lo que prueba la ineficacia de las prohibiciones de exportación. Posteriormente, los barcos de cereales navegaron de Alejandría a puertos de todo el Imperio Romano; llevaban a bordo gatos para tener en jaque a las ratas. Así introducidos, los gatos pudieron haber establecido colonias en las ciudades portuarias y, después, haberse desplegado tierra adentro. Hace unos 2000 años, cuando los romanos expandían su imperio, los gatos domésticos viajaban con sus ejércitos y se asentaron por toda Europa. Pruebas de su expansión proceden del yacimiento alemán de Tofting (Schleswig), que data de entre el siglo IV y el X, y del número creciente de referencias a gatos que aparecen desde entonces en el arte y la literatura. (Extrañamente, parece que los gatos domésticos alcanzaron las islas Británicas antes de que los romanos los llevaran allí, una dispersión cuyas causas desconocemos todavía.)

Mientras tanto, en el lado opuesto del globo, los gatos domésticos se habían extendido presumiblemente hasta oriente hace casi 2000 años, a lo largo de rutas comerciales bien establecidas entre Grecia y Roma, y Extremo Oriente, llegando a China a través de Mesopotamia y alcanzando la India por tierra y por mar. Ocurrió entonces algo de sumo interés. Puesto que en el Lejano Oriente no había gatos monteses nativos con los que los recién llegados pudieran cruzarse, los gatos domésticos orientales pronto empezaron a trazar su propia senda evolutiva.

En efecto, grupos pequeños y aislados de gatos domésticos orientales adquirieron de forma gradual colores de pelaje distintivos y otras mutaciones mediante un proceso de deriva genética, que fija en una población rasgos que no son beneficiosos ni maladaptativos.

Esa deriva condujo a la aparición del korat, el siamés, el birmano y otras razas "naturales", que fueron descritas por monjes budistas tailandeses en el libro *Tamara Maew* ("Poemas del libro de los gatos"), que se remonta alrededor de 1350. La antigüedad de esas razas fue corroborada por estudios genéticos que se anunciaron en 2008, en los que Marilyn Menotti-Raymond, del estadounidense Instituto Nacional del Cáncer, y Leslie Lyons, de la Universidad de California en Davis, hallaron diferencias en el ADN entre las razas de gatos domésticos actuales europeas y orientales, que indicaban más de 700 años de cría independiente de gatos en Asia y Europa.

No hemos avanzado en el conocimiento del momento en que los gatos domésticos pusieron

GANDEE VASAN *Getty Images (gatos)*; TIM FLACH *Getty Images (perros)*

La verdad sobre gatos y perros

Los perros presentan una amplia gama de tamaños, formas y temperamentos. Los gatos domésticos, en cambio, son más homogéneos; difieren sobre todo en el pelaje. La razón de esa menor variabilidad gatuna es sencilla: los humanos han criado desde hace tiempo perros para que les asistan en tareas concretas (cazar, tirar de trineos); los gatos, en cambio, carecen de ninguna inclinación por realizar la mayoría de las tareas que serían útiles a los humanos, por lo que no experimentaron presiones selectivas de cría.

pie en las Américas. Según parece, Cristóbal Colón y otros navegantes renacentistas llevaron gatos consigo en sus viajes transatlánticos. Y se dice que los viajeros del *Mayflower* y los residentes de Jamestown habían traído gatos para controlar las sabandijas y procurar buena suerte. Más oscura todavía es la llegada de los gatos domésticos a Australia, aunque se supone que lo hicieron junto a los exploradores europeos en el transcurso del siglo XVII. Nuestro grupo en el estadounidense Instituto Nacional de la Salud ha acometido su estudio aplicando técnicas de ADN.

Embellecimiento

Aunque los humanos pudieron haber desempeñado un papel menor en el desarrollo de las razas naturales en Oriente, los esfuerzos concertados para producir nuevas razas no empezaron hasta hace poco. Ni siquiera los egipcios, de los que sabemos que criaban gatos a gran escala, seleccionaron, que se sepa, rasgos visibles, probablemente porque no habían surgido todavía variantes distintivas: en sus pinturas, los gatos monteses y los domésticos poseen el mismo pelaje atigrado con rayas verticales (“mackerel-tabby”).

Los expertos creen que la mayoría de las razas modernas se desarrollaron en las islas Británicas en el siglo XIX; se fundan en los escritos del artista de historia natural Harrison Weir. En 1871, las primeras razas ornamentales de gatos (razas creadas por los humanos para conseguir un aspecto concreto) se exhibieron en una exposición gatuna que se celebró en el Palacio de Cristal de Londres (ganó un persa, aunque el siamés causó sensación).

En la actualidad, la Asociación estadounidense de Criadores de Gatos y la Asociación Internacional de Gatos reconocen unas 60 razas de gato doméstico. En estas razas, sólo una docena de genes explican las diferencias de color, longitud y textura del pelo, así como el sombreado, el brillo y otras características del pelaje más sutiles.

Apoyados en la secuenciación del genoma de un gato abisinio llamado Cinnamon, obtenida en 2007, los genéticos van identificando las mutaciones que producen rasgos como el patrón rayado y moteado (“tabby”), los colores negro, blanco y naranja, el pelo largo y muchos otros. Sin embargo, más allá de las diferencias en los genes relacionados con el pelaje, la variación genética entre las razas de gatos domésticos es escasa, equiparable a la que se observa entre poblaciones humanas vecinas, tales como franceses e italianos.

La amplia gama de tamaños, formas y temperamentos que se dan en los perros (fijémonos en el chihuahua y el gran danés, por ejemplo) no aparece en los gatos. Los felinos muestran menor variedad porque, a diferencia de los perros (que empezaron a criarse en época prehistórica para tareas de vigilancia, caza y pastoreo), los gatos salvajes no se vieron sometidos a tales presiones de cría selectiva. Para entrar en nuestras casas sólo debían mostrar una disposición amable para con la gente.

¿Están, pues, realmente domesticados los gatos actuales? Sí, pero poco. Aunque satisfacen el criterio de tolerar a la gente, la mayoría de los gatos domésticos son ariscos y no dependen de las personas para alimentarse o aparearse. Mientras otros animales de compañía, como los perros, guardan poca semejanza con sus antepasados salvajes, el gato doméstico conserva en buena medida la estructura corporal del gato montés. Con todo, muestra ciertas diferencias morfológicas: unas patas ligeramente más cortas, un cerebro menor y, como observó Charles Darwin, un intestino más largo, quizás una adaptación a una dieta basada en restos de comida.

Pero el gato doméstico no ha dejado de evolucionar, ni mucho menos. Pertrechados con las técnicas de la inseminación artificial y la fecundación *in vitro*, los criadores están introduciendo la genética del gato doméstico en un territorio desconocido: están hibridando gatos domésticos con otras especies de félidos para crear nuevas razas exóticas. El bengal y el caracat son el resultado de cruzar el gato doméstico con el leopardo asiático y con el caracal, respectivamente. El gato doméstico quizá se halle al borde de una evolución radical y sin precedentes hacia un híbrido multiespecífico cuyo futuro sólo cabe imaginar.

2. EVOLUCION ACTUAL. El apareamiento de gatos domésticos con especies de félidos exóticos está revolucionando la genética del gato doméstico. La fotografía muestra un savannah, cruzamiento entre un gato doméstico y un serval.

CORTESIA DE KATHRIN STUCKI *A1 Savannahs*

Bibliografía complementaria

CATS: ANCIENT AND MODERN. Juliet Clutton-Brock. Harvard University Press, 1993.

THE NATURAL HISTORY OF THE WILD CATS. Andrew Kitchener. Cornell University Press; Comstock, 1997.

A NATURAL HISTORY OF DOMESTICATED MAMMALS. 2.ª edición. Juliet Clutton-Brock. Cambridge University Press; Natural History Museum, 1999.

THE NEAR EAST ORIGIN OF CAT DOMESTICATION. Carlos A. Driscoll *et al*. en *Science*, vol. 317, págs. 519-523; 2007.

PATTERNS OF MOLECULAR GENETIC VARIATION AMONG CAT BREEDS. Marilyn Menotti-Raymond *et al*. en *Genomics*, vol. 91, n.º 1, págs. 1-11; 2008.

LASERES ULTRALARGOS

Láseres de fibra óptica de gran longitud pueden transmitir información óptica sin que sufra pérdidas en su interior

Juan Diego Ania Castañón

En el año 1870, John Tyndall demostró que era posible canalizar la luz utilizando como medio de transmisión un simple chorro de agua. Su humilde experimento estaba sentando los cimientos de la fotónica moderna.

La fotónica, la ciencia dedicada a estudiar la generación, el control, la transmisión y la detección de la luz, impregna hoy en día nuestra vida cotidiana con infinidad de aplicaciones determinantes en campos que van desde las telecomunicaciones hasta la medicina. Está detrás de cada pantalla de cristal líquido y de cada aparato de CD, DVD o Blu-ray, será clave en el desarrollo de los ordenadores del futuro y es una herramienta fundamental en el estudio de otras áreas de la ciencia.

Al espectacular desarrollo de la fotónica desde la segunda mitad del siglo XX han contribuido en gran medida dos importantes avances: la creación del láser y el desarrollo de la fibra óptica. Apoyándose en ambos, nuestro grupo ha demostrado recientemente la posibilidad de construir de forma sencilla un medio de transmisión a largas distancias casi perfectamente transparente y, por tanto, casi ideal.

La fibra óptica de vidrio, capaz de transportar luz mediante el mismo principio de reflexión interna en que se basó el experimento de Tyndall, había hecho posible el desarrollo del gastroscopio ya en los años cincuenta, pero fue la entrada en escena del láser en 1960 la que introdujo el necesario estímulo tecnológico para ampliar su abanico de aplicaciones. La posibilidad de modular la luz láser tanto en frecuencia como en amplitud y utilizarla para enviar información a trevés de fibra óptica resultó inmediatamente tentadora en el campo de las comunicaciones.

La posibilidad teórica de crear transmisores que enviasen una gran cantidad de datos en muy poco tiempo por medio de fuentes de luz fomentó un rápido avance de las técnicas de fabricación de fibra óptica. Se trataba de crear un medio de transmisión de la luz que ofreciera algo equivalente a lo que las líneas de cobre suponían para las señales eléctricas. Tan ambicioso proyecto tropezaba, sin embargo, con un problema espinoso: la atenuación que la luz experimentaba con la distancia al propagarse a través de la fibra, a causa tanto de las pérdidas hacia el exterior de ésta como de la absorción interna. En una fibra de aquel entonces la atenuación era del orden de los 1000 decibelios por kilómetro (dB/km); es decir, perdía el 99 % de la potencia en los primeros 20 metros de propagación. A comienzos de los años setenta, la atenuación en

CONCEPTOS BASICOS

- Los láseres ultralargos son láseres que se fabrican a partir de fibra óptica y cuyas cavidades resonantes pueden medir cientos de kilómetros.
- Esa gran longitud les otorga algunas propiedades diferentes a las de otros láseres.
- Puede utilizarse como medio para transmitir información en forma de pulsos de luz sin que éstos experimenten atenuación.

la fibra se había reducido ya por debajo de los 20 dB/km. En la actualidad, las pérdidas en las fibras ópticas habitualmente utilizadas para enviar datos a largas distancias están muy cerca del límite inferior físicamente alcanzable, con valores que rondan los 0,2 dB/km (equivalentes a perder un 5 % de la potencia por kilómetro) para las longitudes de onda en el infrarrojo que suelen utilizarse para transmitir información (cercanas a los 1550 nanómetros).

Sistemas de comunicaciones ópticos

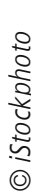
Gracias a esta baja atenuación, la fibra óptica resulta en la actualidad la mejor opción cuando se trata de enviar ingentes cantidades de información a largas distancias. Algunos de los enlaces ópticos más recientes de entre los establecidos entre Europa y EE.UU., como el sistema Apolo, terminado en 2003, opera actualmente a 3,2 Tbit/s (3,2 billones de bits, o terabits, por segundo). Para alcanzar estas capacidades, el Apolo utiliza sólo cuatro pares de cables de fibra, cada uno de ellos no mucho más grueso que un cabello humano, que se extienden a lo largo de miles de kilómetros.

En unos pocos años, ni siquiera con semejantes capacidades podrá satisfacerse la demanda creciente, por parte de los usuarios, de servicios de telecomunicación nuevos, mejores y más rápidos, lo que obligará a actualizar o reemplazar los actuales enlaces por otros dependientes de técnicas más modernas. No en vano desde la aparición de los primeros sistemas de fibra óptica en los años setenta el producto de la capacidad máxima por la distancia ha ido duplicándose de año en año. (La capacidad máxima y la distancia son inversamente proporcionales.)

Dado que los sistemas de comunicaciones ópticos se extienden a menudo a través de distancias de varios miles de kilómetros, incluso la baja atenuación que presenta una fibra óptica moderna es suficiente para que la señal se desvanezca casi por completo mucho antes de alcanzar su destino. Por esa razón se necesitan amplificadores. Tradicionalmente, la amplificación en un sistema de fibra óptica se ha venido llevando a cabo de forma periódica, restituyendo la intensidad de la señal a su nivel inicial cada 50 o 100 kilómetros, siempre con el objetivo de que mantenga una intensidad adecuada para su correcta detección en destino.

La amplificación introduce, sin embargo, un nuevo problema. Dado que el amplificador es incapaz de distinguir entre los fotones que componen la señal y los pocos fotones de similar longitud de onda que se generan es-

1. LA INFORMACION, codificada digitalmente en forma de pulsos de luz equivalentes a unos y ceros, se transmite a enormes distancias a través de fibras ópticas.



pontáneamente en la fibra óptica, el número de fotones de ambos tipos se ve amplificado por igual. Ahora bien, los fotones emitidos espontáneamente no transportan información, sino ruido aleatorio, que al verse amplificado contamina la señal y puede terminar por hacerla irreconocible al cabo de varias repeticiones del proceso de amplificación. Para complicar aún más las cosas, en el propio amplificador se generan fotones de ruido adicionales que contribuyen a distorsionar la señal.

En la base del problema del ruido está el hecho de que la señal sufre una importante atenuación antes de ser amplificada, mientras que el número de fotones emitidos aleatoriamente persiste casi constante; por lo tanto, la intensidad del ruido nunca cae por debajo de un nivel mínimo. Si consiguiéramos amplificar la señal cada muy pocos metros, de modo que apenas se atenuase, entonces la relación señal-ruido (el cociente entre la intensidad de la señal y la del ruido) debería ser casi constante, con independencia de la distancia total recorrida. Pero resulta imposible, por razones económicas y prácticas, instalar un amplificador cada pocos cientos de metros, o incluso cada pocos kilómetros. Pese a ello, existe una interesante alternativa; el efecto Raman, un fenómeno físico que permite transferir fotones de una frecuencia o longitud de onda a otra por medio de su interacción con las moléculas del material.

Este fenómeno de dispersión inelástica —colisiones en las que cambia la energía de los fotones y, por ende, su longitud de onda—, que se da espontáneamente en cualquier material a través del cual se propague una radiación electromagnética, suele ser ineficiente: convierte pocos fotones de una longitud de onda a otra. Sin embargo, cuando en el medio existe ya una presencia suficiente de radiación con una longitud de onda igual a la de destino, la dispersión Raman se transforma en un proceso estimulado —una "cascada"— con un alto grado de eficiencia. De este modo puede usarse, por ejemplo, para producir amplificación o para crear láseres de fibra óptica.

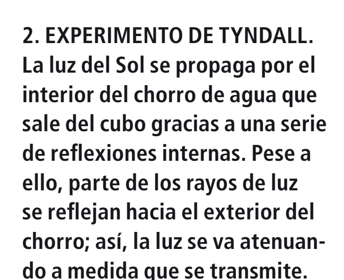
La ventaja de este tipo de amplificación reside en su distribución a lo largo de la fibra. La amplificación Raman no se ciñe a puntos concretos (por ejemplo, cada 50 kilómetros) o a cuando la señal ya ha sufrido una atenuación considerable; antes bien, se produce de forma gradual a lo largo de toda la distancia de propagación. Basta con enviar, junto con la señal que se desea transmitir, un potente haz de luz, llamado "de bombeo", de una longitud de onda cuidadosamente escogida, que vaya transfiriendo de manera paulatina fotones a la señal para compensar las pérdidas que sufre a causa de la atenuación. Por desgracia, el propio haz de bombeo sufre atenuación, lo que hace que la amplificación sea menos eficiente cuanto más nos alejamos de la fuente de luz y, con ello, de la situación ideal, en la cual las pérdidas se verían compensadas al instante y de forma precisa. Aun así, la amplificación Raman permite reducir en buena medida la cantidad de ruido introducida en el sistema, mucho mejor que con los métodos de amplificación tradicionales.

Con la proliferación a finales de los noventa de láseres de fibra lo bastante potentes y estables para generar amplificación Raman de forma eficiente, el método ha ganado en popularidad y se aplica hoy en día en muchos de los sistemas de comunicaciones de nuevo desarrollo.

El efecto Raman

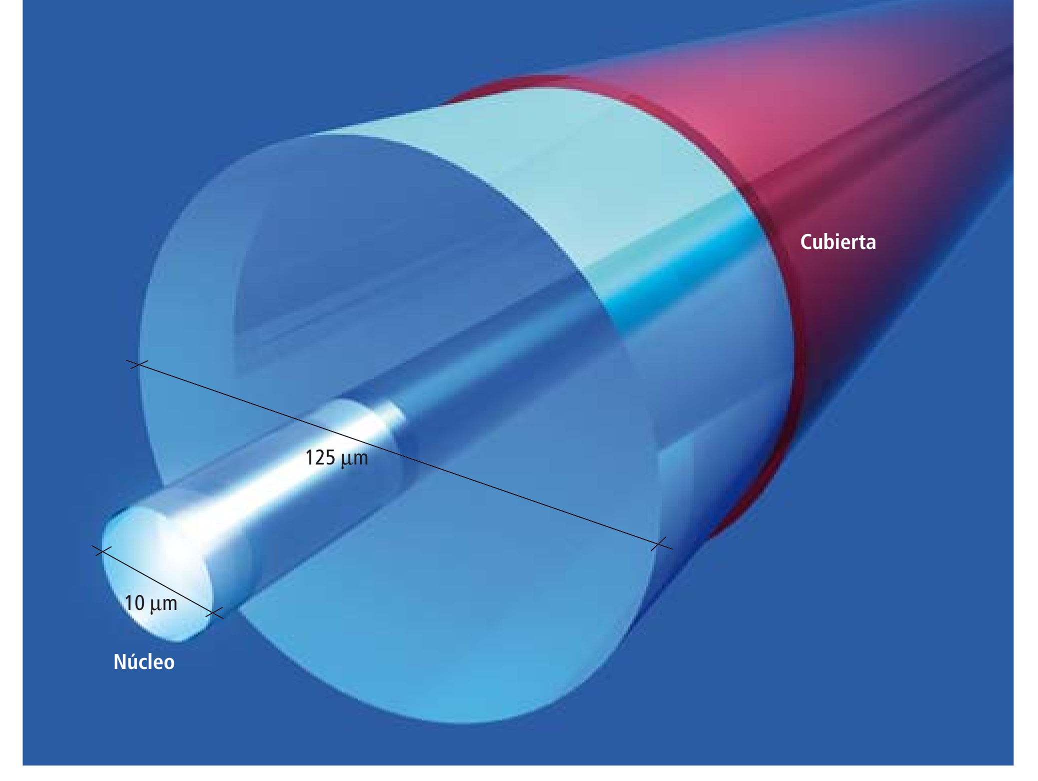
La historia del descubrimiento del fenómeno que hoy conocemos como efecto Raman o dispersión Raman resulta un tanto tormentosa. Aunque han pasado 80 años desde la publicación de su primera demostración experimental por parte de Chandrasekhara Venkata Raman y Kariamanickam Srinivassa Krishnan, sigue abierto el debate sobre la denominación correcta del fenómeno: efecto Smekal-Raman (puesto que fue Adolf Smekal quien predijo y describió teóricamente el fenómeno en 1923), efecto Raman-Krishnan (por Raman y su alumno, que trabajaron juntos en el descubrimiento), efecto Raman-Mandelstam-Lindsberg (por los dos físicos soviéticos que descubrieron el fenómeno de forma simultánea e independiente) o alguna otra combinación de estos nombres.

El propio Raman, según apuntó Krishnan en sus diarios de 1928, se refería inicialmente



2. EXPERIMENTO DE TYNDALL. La luz del Sol se propaga por el interior del chorro de agua que sale del cubo gracias a una serie de reflexiones internas. Pese a ello, parte de los rayos de luz se reflejan hacia el exterior del chorro; así, la luz se va atenuando a medida que se transmite.

JUAN DIEGO ANIA CASTAÑON



3. CORTE TRANSVERSAL DE UNA FIBRA OPTICA. En una fibra óptica de vidrio, como las empleadas en comunicaciones a larga distancia, la luz se transmite por el interior de un estrecho núcleo mediante reflexión interna. Los índices de refracción de la cubierta y el núcleo se escogen cuidadosamente para optimizar las propiedades de la fibra; se reducen las impurezas para minimizar la atenuación debida a la absorción de fotones por iones presentes en el material.

JUAN DIEGO ANIA CASTAÑON

al fenómeno como "efecto Kramers-Heisenberg", en referencia a un trabajo teórico publicado pocos años antes, aunque posteriormente abrazaría la iniciativa de otros científicos de bautizarlo con su propio apellido.

Resultaba, pues, inevitable que se terminase considerando discutible la decisión de conceder en exclusiva a Raman el premio Nobel de 1931 por este descubrimiento, sobre todo en tiempos recientes, con la perspectiva otorgada por el tiempo transcurrido. En cualquier caso, la importantísima contribución de Raman es innegable, como lo fueron su extraordinaria intuición a la hora de identificar el fenómeno y su inventiva a la hora de diseñar los experimentos que llevaron a su demostración. Utilizando primero la luz del sol, concentrada mediante el uso de lentes, y más tarde luz generada con un arco voltaico, Raman demostró que la forma en que la interacción entre radiación y material cambiaba la composición del espectro electromagnético incidente dependía exclusivamente de la estructura molecular del material; por tanto, estudiando la composición de la radiación de salida era posible identificar inequívocamente el medio de transmisión. Sus descubrimientos inauguraron la técnica experimental conocida como espectroscopía Raman, que desde entonces ha sido un instrumento fundamental en múltiples ramas de la ciencia.

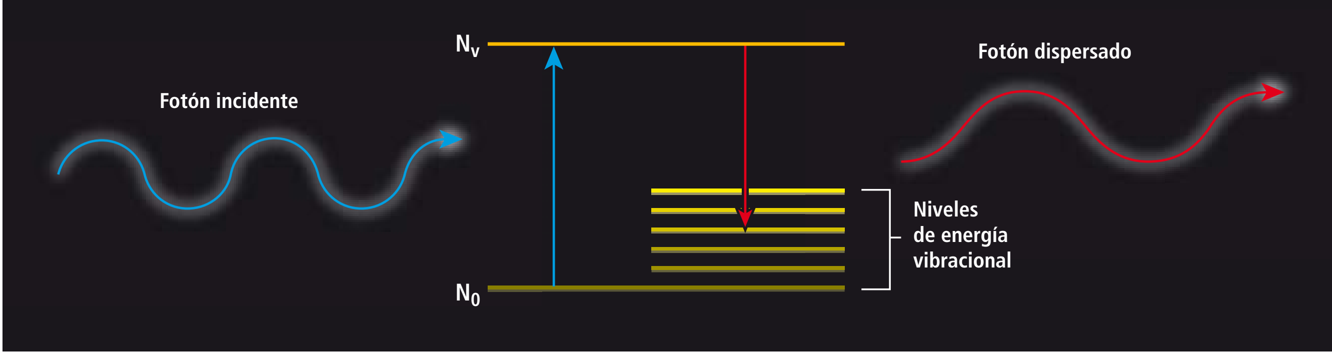
En el proceso de dispersión Raman, un fotón incidente es absorbido por una de las moléculas del medio, que emite a continuación un fotón con una frecuencia diferente. La diferencia entre las frecuencias del fotón incidente y el dispersado se explica por el almacenamiento (si la frecuencia del fotón emitido es inferior a la del incidente) o la extracción (si la frecuencia del fotón emitido es superior a la del incidente) de energía vibracional en la molécula. La estructura de la molécula y, por tanto, el tipo de material utilizado como medio, es el que determina la capacidad para almacenar energía vibracional. Desde un punto de vista cuántico, estaríamos hablando de un proceso en el que a la energía del fotón incidente se añade o se resta la de un fonón óptico característico del material, lo que permitiría cumplir el principio de conservación de la energía a pesar de que el fotón emitido posee una frecuencia diferente de la del incidente. (Las vibraciones de la red cristalina de los átomos de un sólido son superposiciones de vibraciones simples, de frecuencia bien definida, sujetas a las leyes de la mecánica cuántica. Esta hace que tales vibraciones sean análogas a la propagación de "fonones" por la red.)

El efecto Raman, por tanto, se manifiesta mediante la aparición de dos bandas en el espectro de frecuencias, a ambos lados de la frecuencia de la radiación incidente. Estas dos bandas corresponden, respectivamente, al caso en que la energía vibracional de la molécula se suma a la del fotón incidente y al caso en que parte de la energía del fotón incidente queda almacenada en la molécula como energía vibracional. En principio, la emisión de fotones a una frecuencia inferior de la incidente (el segundo caso mencionado) es mucho más probable que el caso contrario.

Una importante característica del efecto Raman reside en su naturaleza no lineal, es decir, la variación de su comportamiento conforme la intensidad de la radiación incidente aumenta no es simplemente proporcional a ese aumento. Una vez superada una intensidad

DISPERSION RAMAN EN UNA FIBRA OPTICA

Generación de luz a mayores longitudes de onda por efecto Raman. El diagrama ilustra el mecanismo de generación de fotones Stokes, o de menor energía (mayor longitud de onda) que los incidentes, mediante la interacción con una molécula de la fibra, o "efecto Raman". El fotón incidente es absorbido por la molécula, que utiliza su energía para promocionar un electrón del nivel fundamental (N_0) a un nivel energético virtual de vida corta (N_v). El electrón decae a continuación a un nivel de energía vibracional, con energía superior a la del nivel fundamental y emite un fotón con una longitud de onda más larga (energía menor) que la del incidente. La energía de los niveles vibracionales depende de la estructura de la molécula y, por tanto, del material de fabricación de la fibra óptica, que suele ser vidrio compuesto mayormente por dióxido de silicio (SiO_2).



mínima de la radiación incidente, se producen suficientes fotones dispersados para que el proceso pase a ser estimulado; aumenta así su rendimiento.

Láseres de fibra

El primer láser Raman de fibra fue fabricado por R. H. Stolen y sus colaboradores en 1972. Estos láseres, capaces de producir luz de una gran intensidad, permitieron disponer de fuentes para generar amplificación Raman en sistemas de telecomunicaciones.

Para fabricar un láser de fibra Raman típico hay que utilizar una fuente de bombeo intensa, que se suele obtener combinando la luz de varios láseres de semiconductor. El medio físico para el láser lo provee una sección de fibra óptica cuya longitud varía desde las decenas a los pocos cientos de metros. Una de las particularidades de esta fibra estriba en la pequeña perturbación periódica de su índice de refracción, introducida en cada uno de sus extremos. Para ello se quema el núcleo de la fibra con radiación ultravioleta a intervalos regulares. Así se crea una red de difracción unidimensional. Una ley de la óptica aplicada a redes de difracción, la ley de Bragg, permite calcular la distancia entre quemaduras consecutivas en la fibra que hará que la red de difracción actúe como un espejo para la luz de determinadas longitudes de onda (o, lo que es equivalente, de determinadas frecuencias) y siga siendo transparente para el resto. Este proceso puede repetirse para crear espejos que operen a diferentes longitudes de onda.

En el caso de un láser Raman, los espejos están diseñados para reflejar hacia el interior de la fibra la mayoría de los fotones dispersados por efecto Raman que alcanzan los extremos de la fibra. Esta longitud de onda es conocida; según hemos visto, los fotones dispersados se emiten principalmente a una frecuencia resultante de la diferencia entre la frecuencia inicial de los fotones de bombeo y la frecuencia de los fonones ópticos característicos de la energía vibracional de la molécula. Dado que la mayoría de los fotones emitidos es reflejada de vuelta al interior de la fibra, la dispersión Raman se ve estimulada por su presencia y se vuelve más eficiente, emitiendo aún más fotones. El proceso se refuerza a sí mismo y termina por transformar el tramo de fibra en un láser.

Los primeros láseres Raman resultaban inestables y, por consiguiente, poco fiables. No obstante, las técnicas de fabricación han mejorado mucho desde los años setenta. Su uso es hoy generalizado, por ejemplo como fuentes de amplificación o como componente fundamental de fuentes generadoras de luz de gran ancho espectral con aplicaciones como la tomografía óptica coherente, que permite visualizar cortes transversales de tejidos vivos sin necesidad de realizar ningún tipo de cirugía.

Hacia la transmisión ideal

Hace unos pocos años sugerí que sería posible ampliar la escala del láser Raman de fibra para aplicarlo a longitudes mucho más largas y utilizar el comportamiento de la luz confinada en la cavidad de fibra para acercarnos más a la situación de amplificación ideal. En 2006, mi grupo de la Universidad de Aston y yo probamos experimentalmente que era posible crear estos láseres Raman ultralargos, logrando, para distancias de más de 80 kilómetros, transmisiones en las cuales la potencia de la señal

JUAN DIEGO ANIA CASTAÑON

El autor

Juan Diego Ania Castañón trabaja en el estudio de diversas aplicaciones de efectos no lineales (como el efecto Raman) en el campo de la fotónica. Se licenció en física por la Universidad Complutense de Madrid y obtuvo su doctorado en el Instituto de Estructura de la Materia del CSIC y la Universidad de Oviedo. Tras un período de 6 años trabajando con el Grupo de Fotónica de la Universidad de Aston, en el Reino Unido, se incorporó en 2007 como científico titular al Instituto de Optica del CSIC, donde ocupa actualmente el puesto de vicedirector.

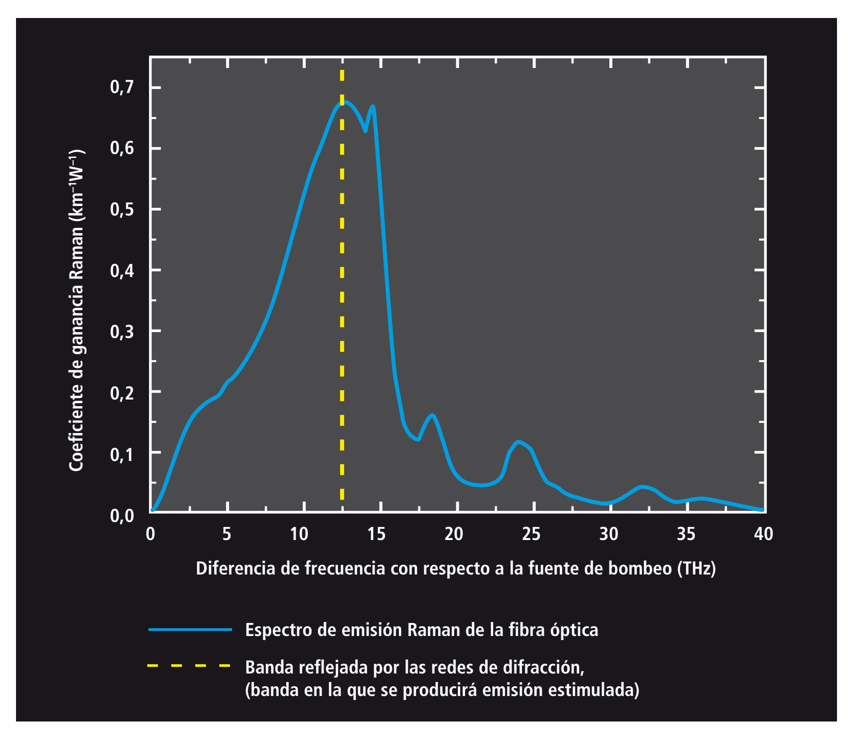
permanece virtualmente constante a lo largo de la fibra, con la consiguiente reducción en el ruido de emisión espontánea amplificada.

Desde el punto de vista teórico, el paso fundamental en la clase de sistemas aludida consiste en dejar de considerar el láser Raman como una fuente de luz externa utilizada para generar un haz de bombeo que acompañe a la señal, para considerarlo, en cambio, como el sistema de transmisión en sí mismo. Por una razón muy sencilla: desde el momento en que un haz de bombeo abandona el láser que lo genera y comienza a propagarse por la fibra, la intensidad de la luz decae exponencialmente con la distancia. Por el contrario, en el interior del láser la constante emisión estimulada mantiene casi completamente estable la intensidad de la luz generada en su interior. Si consiguiéramos construir un láser lo bastante largo, podríamos transmitir información por su interior; como en éste la intensidad del haz de bombeo generado no decae, éste proveería a la señal que deseamos amplificar de un flujo constante de fotones. Tal y como demostramos en 2006, la fabricación de láseres Raman ultralargos, amén de posible, no reviste grandes complicaciones técnicas.

En nuestro primer diseño de láser ultralargo aplicamos el efecto Raman en cascada. Nuestro objetivo era fabricar un sistema capaz de transmitir información; las longitudes de onda empleadas en el láser vinieron, pues, dictadas por nuestro deseo de transmitir en el infrarrojo, a 1550 nanómetros (nm), como corresponde a las especificaciones típicas de un sistema de comunicaciones ópticas. Dos láseres externos idénticos y muy potentes emiten luz a 1365 nm, es decir, de una frecuencia de 219,8 terahertz (THz) hacia el interior de la fibra. En ambos extremos de la fibra se inscriben redes de difracción que actúan como espejos que reflejan sólo la radiación a 1455 nm (206,2 THz), si bien resultan transparentes para cualquier otra longitud de onda.

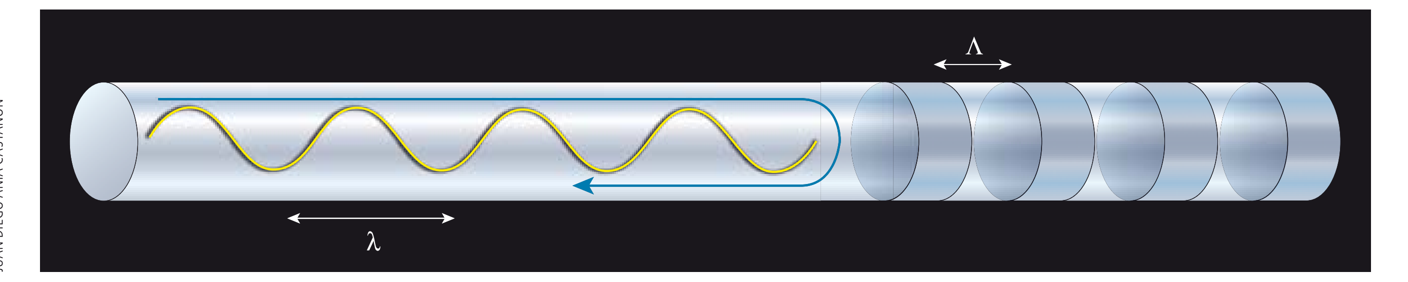
La fibra óptica utilizada para transmitir es común, principalmente de óxido de silicio (SiO_2), como un vidrio. En las moléculas de óxido de silicio, la frecuencia correspondiente a la energía almacenada en forma de vibraciones se encuentra aproximadamente entre 12,7 y 13,6 THz. Esto hace que los fotones a 1365 nm se dispersen por efecto Raman a una longitud de onda aproximadamente igual a 1455 nm. Los fotones a 1455 nm se quedan atrapados en la fibra, al no poder atravesar los espejos.

En el momento en que el ritmo al que se crea luz a 1455 nm supera el ritmo al que la atenuación por la fibra la disipa, el sistema entero comienza a funcionar como un láser y a acumular más y más luz a esa longitud de onda, al tiempo que la conversión de

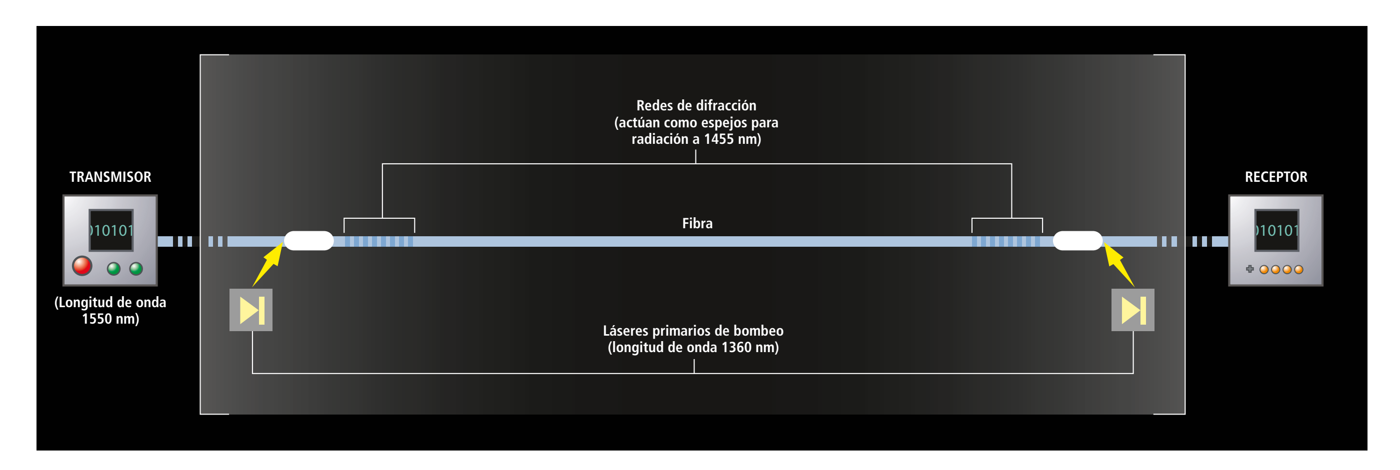


4. ESPECTRO DE EMISION RAMAN DE UNA FIBRA OPTICA DE VIDRIO. Cuando las moléculas de SiO_2 que componen la fibra óptica reciben radiación de una determinada longitud de onda se genera luz de longitudes de onda más largas, a causa del efecto Raman. La mayoría de los fotones emitidos se generan con una frecuencia de alrededor de 13 THz, menor que la de los fotones incidentes. Atrapando esos fotones con ayuda de espejos, podemos amplificar esa conversión mediante emisión estimulada, el proceso en que se basan los láseres.

5. RED DE DIFRACCION EN FIBRA. En una fibra óptica, el papel de los espejos lo desempeñan las redes de difracción. Estos dispositivos se fabrican induciendo una perturbación en el índice de refracción del núcleo de la fibra. La ley de Bragg predice que aquellas frecuencias cuya longitud de onda λ sea igual a $2n\Lambda$ (donde n es el índice de refracción de la red de difracción y Λ es el período de la perturbación) se reflejarán en dirección contraria al alcanzar el tramo de fibra que tiene inscrita la red de difracción.



JUAN DIEGO ANIA CASTAÑON



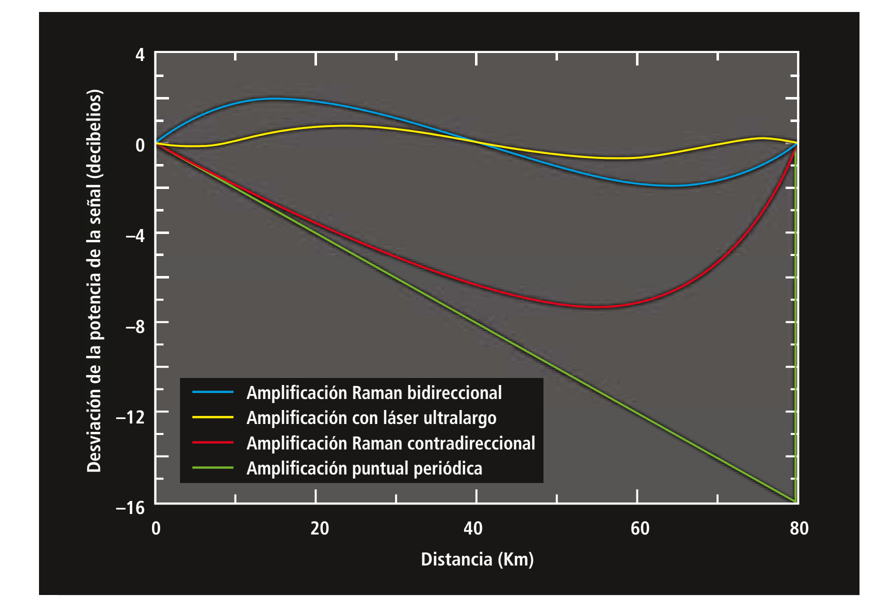
6. SISTEMA DE TRANSMISION CON UN LASER ULTRALARGO. En un láser ultralargo, dos fuentes de bombeo, que emiten a una longitud de onda cercana a 1360 nm, provocan la emisión estimulada por efecto Raman de radiación a 1455 nm, que queda atrapada en la fibra gracias a las redes de difracción. Esta radiación a 1455 nm es la que amplifica (también por efecto Raman) la señal que se propaga entre el emisor y el receptor a 1550 nm.

1365 nm a 1455 nm se vuelve más rápida y eficiente. Por último, se alcanza un equilibrio entre el ritmo al que el efecto Raman dispersa los fotones desde 1365 nm a 1455 nm y la atenuación que esa luz a 1455 nm sufre en la fibra (por los fotones de 1455 nm que se escapan del núcleo de la fibra o son absorbidos por el material). A partir de ese momento, la intensidad de la luz a 1455 nm contenida dentro de la fibra (ahora un láser) resulta constante y casi perfectamente uniforme con la distancia. Si enviamos entonces una señal a 1550 nm (193,5 THz), la luz a 1455 nm puede aprovecharse para amplificar la señal de modo uniforme, utilizando una vez más el efecto Raman.

Aplicando este sencillo esquema hemos fabricado láseres con longitudes que oscilan entre unos pocos kilómetros y más de 150. Lo que es más importante, hemos observado una considerable reducción en el ruido de emisión espontánea amplificada, en perfecto acuerdo con las predicciones teóricas. La potencia de luz de bombeo necesaria para la transmisión sin pérdidas de la señal, aunque elevadas, no lo son mucho más que en un sistema con amplificación Raman ordinaria. Por ejemplo, en el caso del láser de 75 kilómetros, la potencia total necesaria fue de aproximadamente 1,3 W. La variación total de la potencia de la señal a lo largo de toda esa distancia apenas superó el decibelio.

La sección de fibra con los espejos y los láseres de bombeo puede repetirse múltiples veces para alcanzar distancias de transmisión tan largas como resulte necesario (varios miles de kilómetros), hasta llegar al receptor, sin que la señal sufra variaciones reseñables en su intensidad. Una de las ventajas de este diseño, a pesar de su simplicidad, es que, gracias a la superposición de los espectros de dispersión Raman del láser de bombeo a 1365 nm y el de la radiación atrapada en la cavidad a 1455 nm, el sistema puede amplificar a lo largo de un ancho de banda de aproximadamente 36 nm alrededor de los 1550 nm. Cabe, pues, enviar varios canales de comunicación por la misma fibra, cada uno de ellos a una frecuencia diferente (una técnica conocida como multiplexado en frecuencia) y amplificarlos todos al mismo tiempo.

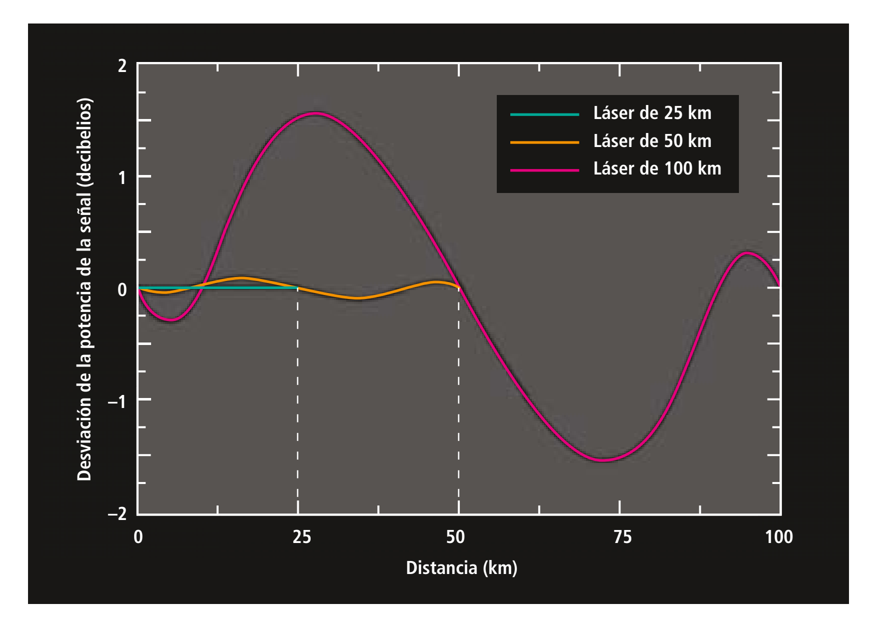
Así como los láseres con longitudes de 50 o más kilómetros presentan interesantes aplicaciones en las comunicaciones a larga distancia, al evitar la acumulación de ruido en la señal, el uso de láseres ultralargos de unas pocas decenas



7. DISTINTAS SOLUCIONES PARA AMPLIFICAR LA SEÑAL. Un láser ultralargo permite reducir en gran medida las variaciones de intensidad de la señal a lo largo de la propagación, más que otros métodos de amplificación de similar complejidad. La figura muestra la evolución típica de la potencia de la señal a través de una fibra de 80 kilómetros cuando se aplican diferentes soluciones para lograr la amplificación. Aunque en todos los casos la intensidad se recupera completamente al final de la línea, la presencia de oscilaciones durante la propagación provoca una degradación en la calidad de la señal.

JUAN DIEGO ANIA CASTAÑON

8. MEDIO TRANSPARENTE. Un láser ultralargo permite reducir las variaciones de la señal incluso en transmisiones a largas distancias, pero su eficacia como medio de transmisión sin pérdidas es particularmente evidente a distancias moderadas; por ejemplo, de 25 kilómetros o menos. En este caso, la variación de la señal es realmente imperceptible desde el punto de vista experimental y podemos hablar, con propiedad, de un medio transparente de transmisión.



JUAN DIEGO ANIA CASTAÑÓN

de kilómetros permite la creación de sistemas ópticos en los que la fibra se comporte como un medio transparente ideal. La posibilidad de crear enlaces en los que las pérdidas resulten despreciables abre la puerta al diseño de sistemas ópticos con propiedades muy diferentes de las que caracterizan a los sistemas actuales; tales sistemas sin pérdidas serían susceptibles de ser descritos y estudiados matemáticamente con herramientas que hasta el momento no podían aplicarse a sistemas reales. La eliminación de la atenuación por la fibra permite explotar las propiedades no lineales del medio para crear, por ejemplo, dispositivos de procesado de la señal basados en la teoría de los sistemas no lineales integrables, o también sistemas de transmisión basados en solitones (ondas solitarias que no se deforman, sea cual sea la distancia de propagación).

Pese a que la eficacia de los láseres ultralargos para transmitir sin pérdidas decae con la longitud de la cavidad, no existe ningún impedimento teórico para fabricar láseres de longitud mucho mayor, que si bien no serían capaces de transmitir apenas sin pérdidas, sí podrían ofrecer una amplificación eficazmente distribuida a largas distancias y contribuir al abaratamiento de costes de mantenimiento en sistemas sin amplificación intermedia.

Los láseres ultralargos como fuentes de luz

Si bien el concepto de láser ultralargo surgió en un principio con la intención de dar respuesta al problema de las pérdidas en la fibra, encierra interés por sí mismo. Gracias a su extrema longitud, estos láseres presentan propiedades muy diferentes de las de otros láseres de fibra. En particular, la distancia espectral entre las oscilaciones de frecuencia creadas por los modos de la cavidad —las longitudes de onda que caben exactamente un número entero de veces entre los extremos de la fibra—, que en un láser es mayor cuanto menos tiempo tarda la luz en propagarse de un extremo a otro de la cavidad, resulta varios órdenes de magnitud menor que en ningún otro láser. En virtud de ello, los láseres ultralargos se muestran inmunes al llamado "ruido de barrido de modos", que habitualmente está causado por las imperceptibles variaciones en longitud que experimenta el medio de transmisión a causa de los cambios de presión y temperatura.

La extrema proximidad espectral de los modos de la cavidad podría aprovecharse para generar peines espectrales con aplicación directa en sistemas de medición de gran precisión. (Un peine espectral consiste en una sucesión de miles de frecuencias igualmente separadas entre sí, las "púas" del "peine". Acerca de su utilidad, véase "Reglas de luz", por Steven Cundiff, Jun Ye y John Hall; Investigación y Ciencia, junio de 2008.) Recientemente hemos demostrado también que este tipo de cavidades láser ultralargas pueden ser utilizadas para generar eficientemente luz de gran ancho espectral, de intensidad prácticamente constante con independencia de la zona del espectro observada (luz supercontinua).

Un futuro brillante

Con independencia de su campo de aplicación, los láseres ultralargos habrán de superar dificultades en su camino hacia la aplicación práctica. Un escollo previsible para su implantación en el área de las telecomunicaciones concierne a su dependencia de fuentes de bombeo al mismo tiempo potentes y muy estables (y, por tanto, difíciles de fabricar y más caras de lo habitual), para evitar que las oscilaciones en la intensidad distorsionen la señal y contrarresten los beneficios obtenidos gracias a la reducción del ruido de emisión espontánea. No obstante, las abundantes aplicaciones y nuevas direcciones de investigación surgidas a partir de la creación de estas fuentes de luz nos permiten confiar en su continuado desarrollo y utilización en años venideros.

Bibliografía complementaria

THE 1930 NOBEL PRIZE FOR PHYSICS: A CLOSE DECISION? R. Singh y F. Riess en *Notes and Records of the Royal Society*, vol. 55, págs. 267-283; 2001.

C. V. RAMAN AND THE DISCOVERY OF THE RAMAN EFFECT. Rajinder Singh en *Physics in Perspective (PIP)*, vol. 4, págs. 399-420; 2002.

QUASI-LOSSLESS TRANSMISSION USING SECOND-ORDER RAMAN AMPLIFICATION AND FIBRE BRAGG GRATINGS. J. D. Ania Castañón en *Optics Express*, vol. 12, págs. 4372-4377; 2004.

RAMAN AMPLIFICATION IN FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS. Dirigido por C. Headley y G. P. Agrawal. Elsevier Academic Press, 2005.

ULTRALONG RAMAN LASERS AS VIRTUALLY LOSSLESS OPTICAL MEDIA. J. D. Ania Castañón, T. J. Ellingham, R. Ibbotson, X. Chen, L. Zhang y S. K. Turitsyn en *Physical Review Letters*, vol. 96, art. n.º 023902; 2006.

SIMULTANEOUS SPATIAL AND SPECTRAL TRANSPARENCY IN ULTRALONG FIBER LASERS. J. D. Ania Castañón, V. Karalekas, P. Harper y S. K. Turitsyn en *Physical Review Letters*, vol. 101, n.º 123903; 2008.

MEMORIAS RACETRACK

Un dispositivo en el que los bits se desplazan a lo largo de nanohilos podría empaquetar datos en un microchip tridimensional. Tal vez sustituya a las técnicas habituales de almacenamiento de datos

Stuart S. P. Parkin

El mundo, hace un decenio, era muy diferente del actual. Ahora podemos acceder fácilmente a enormes cantidades de información. Hace pocos años, muchos medios hoy de uso cotidiano —redes sociales, buscadores en Internet, toda clase de sistemas en línea, mapas que definen itinerarios, amplísimos repositorios de piezas musicales, libros o fotografías— o no existían o eran inaccesibles. Debemos el advenimiento de esta era de la información a la posibilidad de transmitir y procesar datos a alta velocidad. Y a algo que tal vez sea más importante, aunque menos valorado: el almacenamiento digital de datos.

Cada sistema de almacenamiento de datos tiene, sin embargo, su talón de Aquiles. Por eso se utilizan en los ordenadores memorias de diversos tipos, según su propósito. En nuestros días, la mayor parte de los datos digitales —caso de la información accesible por Internet— reside en inmensos parques de discos magnéticos duros y en el disco duro de cada ordenador. Ahora bien, estos dispositivos, que utilizan platos rotativos y sistemas de cabezas de lectura/escritura, son lentos y no absolutamente fiables. Se producen, con relativa frecuencia, pérdidas de datos porque la cabeza roza el disco y se "estrella". En cuanto a rapidez de acceso, la lectura del primer bit de los datos solicitados puede requerir hasta 10 milisegundos. Una milésima de segundo viene a ser, para un ordenador, una era geológica: en ese tiempo, un procesador moderno llega a efectuar 20 millones de operaciones.

Tal es la razón de que, para operaciones lógicas o de cómputo, se utilice en los ordenadores un segundo tipo de almacenamiento, la memoria de estado sólido. Estas memorias permiten grandes velocidades en la lectura y grabación de datos y, en consecuencia, su procesamiento rápido. Las memorias de más veloces prestaciones, como las de acceso aleatorio, estáticas o dinámicas (denominadas SRAM y DRAM, respectivamente), recurren al estado electrónico de transistores o condensadores microscópicos para albergar los bits de datos. El inconveniente es que los datos contenidos en estos dispositivos se pierden en cuanto se apaga el ordenador o se cuelga.

En algunos —pocos— ordenadores se utilizan memorias no volátiles, que conservan los datos al igual que un disco magnético clásico, cuando se desconecta el aparato. También se emplean memorias no volátiles en los "teléfonos inteligentes", ahora ubicuos, y en otros dispositivos de pequeño tamaño, pero en todos los casos se impone un equilibrio entre el coste y sus prestaciones. La menos cara de las memorias no volátiles es la memoria flash, que algunos llevan colgada en el llavero. Pero la memoria flash es lenta y poco fiable en comparación con los chips de otros tipos de memoria. En los dispositivos "flash", la inscripción de un dato en una célula de memoria exige que se aplique a ésta por breve tiempo un alto voltaje (de ahí el "flash"), que la deteriora un poco; la célula puede quedar inservible al cabo de unas 10.000 operaciones de escritura. No obstante, esta técnica, por su reducido coste, se cuenta entre las dominantes, especialmente en aplicaciones que no exijan modificar los datos demasiado a menudo.

El mundo de la informática reclama, pues, un dispositivo de memoria no volátil que conjugue elevada densidad de almacenamiento con economía y fiabilidad. Dotados de tales memorias, los dispositivos de cómputo resultarían mucho más sencillos y fiables, más veloces y menos consuntivos. Grupos de investigación de todo el mundo están examinando diversos medios para atender tal demanda, entre ellos los que se basan en unos nuevos componentes electrónicos denominados "memristores" (*véase el recuadro* "Memorias en gestación") y los que recurren a la espintrónica, donde el espín o momento magnético de los electrones desempeña un papel clave [*véase* "Espintrónica", por David D. Awschalom, Michael E.

CONCEPTOS BASICOS

- Un diseño radicalmente nuevo para almacenar datos en los ordenadores, la llamada memoria *racetrack*, se basa en el desplazamiento de bits magnéticos a lo largo de hilos nanoscópicos.
- La memoria *racetrack* sería no volátil y conservaría los datos al desconectar la energía eléctrica; se hallaría exenta de los inconvenientes de los discos duros o los chips de memoria no volátil actuales.
- Chips de memoria *racetrack* provistos de datódromos horizontales competirían con ventaja frente a la memoria "flash". Implantando arboledas de datódromos verticales sobre un sustrato de silicio se superarían las densidades de almacenamiento de los discos duros actuales.
- La memoria *racetrack* se enfrenta a varios otros tipos de memoria en fase de desarrollo.

1. UN NUEVO TIPO DE MEMORIA DE ESTADO SOLIDO, basada en hacer que los bits corran a gran velocidad por unos nanohilos (a los que el autor ha llamado *racetracks*, es decir, "pistas de carreras", y a los que aquí denominamos "datódromos"), presentaría las mejores propiedades de las memorias flash y los discos duros actuales, pero no sus deficiencias.

Flatté y Nitin Samarth; Investigación y Ciencia, agosto de 2002].

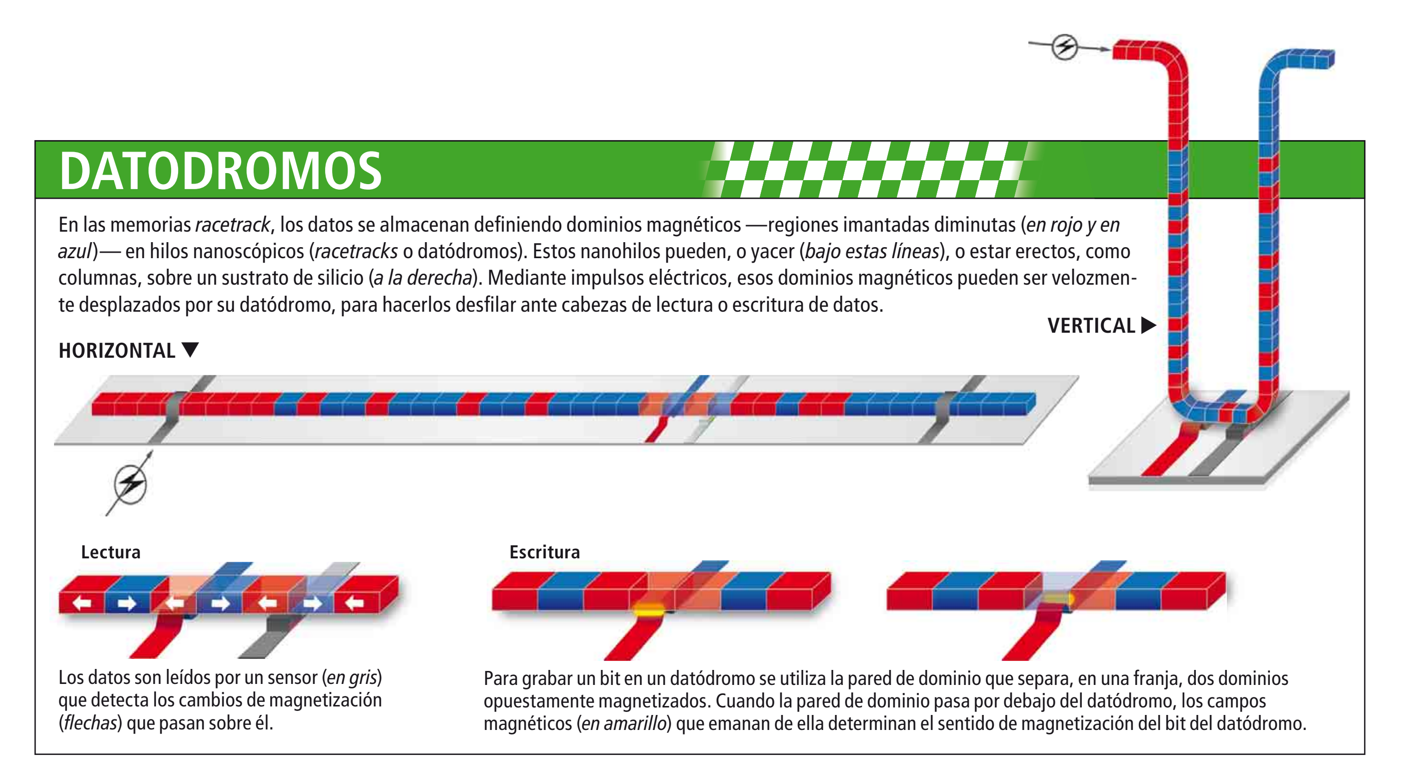
Tal vez la solución consista en una clase nueva de chip espintrónico que propuse en 2002 y al que he llamado memoria *racetrack* (RM). Estas memorias almacenan los bits de datos en tramos imantados de unos nanohilos por donde corren los datos, las *racetracks*, "pistas de carreras" o, como las llamaremos en este artículo, "datódromos". Estas regiones magnetizadas, no volátiles, son regrabables, lo mismo que las de un disco duro, pero la inscripción o lectura de datos en el chip no requiere el desplazamiento de piezas móviles mayores que un electrón, para multiplicar la velocidad de acceso a los datos y la fiabilidad del dispositivo. Los bits viajan a gran velocidad por el datódromo y desfilan ante una cabeza de lectura/escritura ubicada en una posición fija adyacente al hilo.

Además, se pueden construir los hilos de modo que se alcen verticalmente sobre un chip de silicio, como una arboleda. Tal diseño evitaría así las limitaciones inherentes al almacenamiento planar de datos que sufren los discos duros y todos los chips de memoria comercializados en el presente, y permitiría densidades de datos muy elevadas. A mi entender, gracias a las memorias *racetrack* tridimensionales, el almacenamiento de información seguirá avanzando raudo hacia un futuro de aplicaciones, basadas en el manejo de masas enormes de datos, que no podemos ni imaginar todavía.

Inconvenientes de las unidades de disco

La estructura básica de los discos duros no ha cambiado desde que fueron ideados hace más de 50 años, si bien la técnica de sus componentes individuales ha variado enormemente y su tamaño se ha contraído varios órdenes de magnitud. En un disco duro, los datos se almacenan variando la dirección de magnetización de unas regiones diminutas inscritas en una película ultradelgada de material magnético que recubre la superficie de un disco de vidrio sumamente pulido. El disco gira a gran velocidad (7200 rpm en los ordenadores que se venden en la actualidad) bajo una cabeza de grabación situada en un brazo móvil, encargada de efectuar la grabación o lectura de bits magnéticos.

En los primeros tiempos, los discos duros eran dispositivos del tamaño de un refrigerador. El coste por bit almacenado era muy elevado. La cifra que mide el mérito de una técnica de disco es su densidad superficial: el número de bits de datos que es posible almacenar fiablemente en el disco por unidad de superficie magnética. Al principio, las



densidades superficiales de los discos iban mejorando alrededor de un 25 por ciento al año, pero hace unos 20 años, los discos duros se convirtieron rápidamente en máquinas mucho más pequeñas y capaces.

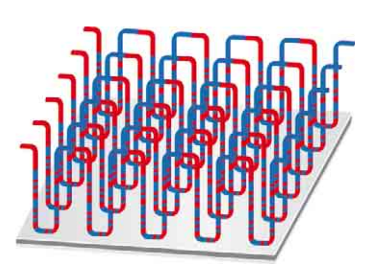
Un hito importante en esta evolución consistió en el desarrollo de cabezas lectoras basadas en la espintrónica, o más exactamente, en lo que prefiero denominar materiales de espines manipulados. Las investigaciones sobre las propiedades fundamentales de los materiales integrados por varios nanoestratos magnéticos que realicé en el período de 1988 a 1991 fructificaron en un sensor magnetorresistivo, la "válvula de espín". Este sensor detecta campos magnéticos diminutos al modificarse su resistencia; en el momento de su invención fue el detector de campos magnéticos a temperatura ambiente de máxima sensibilidad.

La primera aplicación de los sensores de válvula de espín en las cabezas lectoras de los discos duros llegó en 1997 con el Deskstar 16GP "Titan" de IBM. En el plazo de cinco años, las capacidades de almacenamiento de los discos duros se habían multiplicado por 1000, el más acelerado avance en el medio siglo de historia de los discos duros. En nuestros días, la capacidad total de almacenamiento de todos los discos duros fabricados en un mes excede los 200 exabytes, 2×10^{20} bytes, cifra suficiente para almacenar la totalidad de los datos analógicos existentes en el mundo, es decir, todos los datos recogidos en papel, películas y cintas de vídeo.

El sensor de válvula de espín fue el primero de los nanodispositivos espintrónicos. Para comprender el funcionamiento de las memorias *racetrack*, resultan imprescindibles unos rudimentos de espintrónica. El espín constituye una de las propiedades cuánticas fundamentales de los electrones. Imaginemos que cada electrón constituye una bolita de carga eléctrica en rotación sobre sí misma, lo que implica un campo magnético que apunta a lo largo del eje de la rotación, o eje de espín. El eje de espín de un electrón inmerso en un campo magnético se alinea paralela o antiparalelamente al campo. Se dice entonces que tiene "espín arriba" o "espín abajo" con respecto al campo magnético local.

Cuando los electrones se desplazan por un metal imantado, los de espín arriba viajan más fácilmente. El resultado es una corriente de espín polarizado: una corriente donde la mayoría de los electrones en movimiento poseen un espín determinado. En una corriente ordinaria, como la que fluye por un hilo de cobre, los espines de los electrones en movimiento apuntan aleatoriamente en todas las direcciones. El *permalloy*, que es una aleación de hierro y níquel susceptible de intensa magnetización, puede producir hasta un 90 por ciento de polarización del espín en una corriente.

El sensor de válvula de espín consiste en un emparedado de espesores nanoscópicos, con una capa de material no magnético entre dos magnéticas. La primera capa magnética polariza el espín de la corriente en una orientación específica. La segunda capa magnética modifica su magnetismo en una u otra dirección para acomodarlo al campo magnético procedente de cada dominio magnético que pase junto a ella y que en un disco duro representa un 0 o un 1. Cuando las dos capas magnéticas del sensor tienen imantación paralela, la corriente espín-polarizada fluye a su través con relativa facilidad. Pero cuando las capas tienen imantación antiparalela, los electrones polarizados



2. UNA MEMORIA tridimensional, una arboleda de datódromos verticales implantados sobre silicio, podría superar las densidades de datos de los discos duros; además, sin piezas móviles mecánicas.

LUCY READING-IKKANDA

no pueden pasar. Esta modulación de la resistencia del dispositivo es conocida por magnetorresistencia gigante (GMR), fenómeno descubierto independientemente por los grupos de Albert Fert, de la Universidad de París-Sur, y Peter Grünberg, del Centro de Investigación de Jülich, en Alemania. La GMR permite que las cabezas de lectura detecten campos magnéticos mucho más débiles, lo cual consiente, a su vez, que los dominios magnéticos de los discos sean mucho más pequeños, y su empaquetamiento, mucho más compacto.

A pesar de ello, la era del sensor de válvula de espín no duró ni un decenio. Ha sido reemplazado ya en los discos duros que se fabrican en la actualidad con una técnica más moderna, las uniones túnel magnéticas. Las uniones túnel magnéticas se basan en un efecto llamado magnetorresistencia túnel (TMR); su sensibilidad a los campos magnéticos de muy débil intensidad es mayor todavía que la de los dispositivos de válvula de espín.

Aunque las cabezas de lectura espintrónicas han permitido enormes avances en la capacidad de almacenamiento de los discos duros y han contribuido a rebajar el costo de almacenamiento de datos hasta unos 10 céntimos por gigabyte, subsiste en los discos duros la naturaleza mecánica del sistema de platos giratorios y cabezas móviles, que es responsable de dos importantes deficiencias. En primer lugar, cuando la cabeza magnética roza por accidente la capa magnética, se destroza, fallo que puede provocar la pérdida de todos los datos que contiene el disco. En segundo lugar, el consumo de energía necesario para hacer girar un disco de vidrio a 7200 rpm es muy elevado, e incluso a tal velocidad el tiempo de acceso hasta los datos que interesan puede ser millones de veces mayor que el acceso a los datos en cuestión desde una memoria volátil.

En consecuencia, los discos duros presentan muy escasa eficiencia en muchas aplicaciones ordinarias, como el registro de transacciones en cuentas bancarias, pues aunque cada transacción puede implicar un conjunto de datos muy pequeño, se tarda tiempo en hacer girar el disco y en trasladar la cabeza de escritura hasta la ubicación correcta. Resulta necesario, además, hacer copias de seguridad en previsión de averías.

Persistencia de la memoria

Es mucho el tiempo y el esfuerzo que se ha invertido en estos últimos años en desarrollar tipos de memoria no volátil que combinen las características positivas de los discos duros y de los microcircuitos de silicio, y eviten las negativas. En 1995, por ejemplo, el autor y sus colegas de IBM propusieron la construcción de una memoria espintrónica basada en uniones túnel magnéticas. Los datos quedan almacenados en el estado magnético de la unión túnel magnética; su lectura puede efectuarse mediante la magnetorresistencia túnel del dispositivo. Estas memorias magnéticas de acceso aleatorio, llamadas MRAM, fueron puestas a la venta en 2006 por Freescale Semiconductor, una filial de Motorola.

Se han propuesto otros muchos dispositivos de memoria que dependen de un componente cuya resistencia eléctrica pueda modularse por algún medio. Todos ellos, sin embargo, exigen que, para acceder al bit que se desea seleccionar, exista un transistor en serie con cada elemento de memoria resistiva. El tamaño del transistor determina en gran medida el coste de las memorias. A pesar de los impresionantes avances conseguidos, el coste por bit de la memoria de estado sólido más económica —la memoria “flash”— sigue siendo entre 20 y 100 veces mayor que en un disco magnético duro.

La combinación óptima entre el coste y el rendimiento de los discos duros y el de los diversos tipos de memoria de estado sólido implica que sigue siendo razonable construir ordenadores que utilicen muchas diferentes técnicas en el almacenamiento de datos digitales. Así pues, se alojan en la RAM los datos que los programas utilizan activamente, mientras que los discos duros sirven para almacenar provisionalmente los excesos de datos que no cabrían en la RAM, así como para el almacenamiento de larga duración de archivos y programas, para cuando el ordenador se apague o cuelgue. Se utilizan también, para fines especiales, otros tipos de memorias no volátiles, así como memorias invariables, “sólo de lectura”, que es posible consultar pero no modificar.

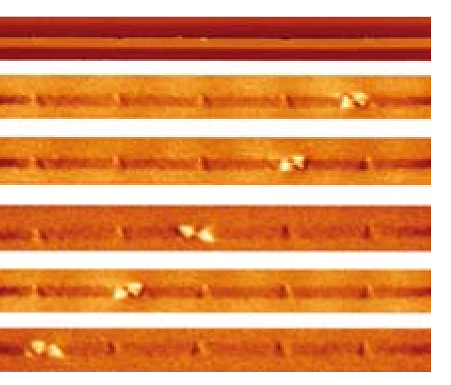
Todo este surtido de técnicas es responsable de que los ordenadores y otros equipos similares resulten más complejos y voluminosos de lo necesario y que su consumo de energía sea mucho mayor de lo que podría ser. Un dispositivo de almacenamiento que sumase a la permanencia de los datos y el reducido coste de los discos duros la velocidad de lectura y escritura y la elevada fiabilidad de las memorias ordinarias de estado sólido cambiaría, por completo, los parámetros del problema. Tal dispositivo podría ser mi memoria *racetrack*.

Cada datódromo de esas memorias consiste en un hilo nanoscópico hecho de un material magnético; por ejemplo, el *permalloy*. Los bits se almacenan en el datódromo en una serie de dominios magnetizados que se disponen a lo largo de su extensión. La orientación magnética de esos dominios en el hilo apunta en un sentido para representar los 0 y en el

El autor

Stuart S. P. Parkin es un *IBM Fellow* (un puesto honorífico que otorga IBM) y gerente del grupo de magnetoelectrónica del Centro de Investigación de IBM en San José, California, profesor consultor del departamento de física aplicada de la Universidad Stanford y director del Centro IBM-Stanford de Ciencia Espintrónica y Aplicaciones. Hace unos veinte años, los trabajos de Parkin y sus colegas de IBM transformaron el fenómeno de la magnetorresistencia gigante, recién descubierto por entonces, en una técnica práctica que llevó a grandes incrementos en la densidad de almacenamiento de datos en los discos magnéticos.

3. DATODROMO EXPERIMENTAL de *permalloy*, aleación de una gran susceptibilidad magnética. Sus dimensiones son 300 nm (nanómetros) de lado y 40 nm de grosor. Los nanohilos emplazados por debajo del datódromo permiten efectuar mediciones de las paredes de los dominios magnéticos del datódromo. Este montaje corresponde a una de los centenares de diferentes estructuras de microcircuito sometidas a investigación en IBM, la denominada “Acueducto”.



4. UNA PARED DE DOMINIO MOVIL (*dibujo en doble flecha*) viaja a lo largo de una pista de 300 nm de anchura en etapas controladas. En una imagen obtenida por microscopía de fuerza atómica (*franja superior*) se aprecian las muescas en un costado de la pista que enclavan las paredes magnéticas cuando no existen corrientes que las empujen. En las cinco fotografías tomadas con microscopio de fuerza magnética (*franjas restantes*) se aprecia la intensidad de campo magnético, que es máxima en la pared del dominio. Se ha logrado el control simultáneo de hasta seis dominios.

contrario para representar los 1. Exactamente lo mismo que en los discos, tales dominios conservan su estado magnético cuando se apaga el ordenador.

Sin embargo, a diferencia de los discos, el material magnético no se mueve nunca. Por el contrario, son los bits los que viajan hacia delante o atrás por su propia pista, pasando, al hacerlo, ante una cabeza de lectura y una cabeza de escritura, emplazadas en algún lugar del camino. De ese modo, los cientos de bits de cada pista exigen sólo unos pocos transistores, en lugar de requerir al menos un transistor para cada bit, como en los diseños ordinarios de memorias de estado sólido.

Esta idea de desplazar datos magnéticos por un medio, en vez de mover el propio medio que los contiene, es en cierto sentido bastante antigua. Las memorias de burbuja magnética, que tuvieron su día de gloria en los años setenta, se basaban en el desplazamiento de pequeños dominios magnéticos (las "burbujas"), pero los discos magnéticos y las memorias de estado sólido las desbancaron al hacerse cada vez más pequeños y veloces. Un complicado sistema de campos magnéticos desplazaba las burbujas. La memoria *racetrack* se vale de una fuerza motriz espintrónica, mucho más sencilla.

La clave del desplazamiento de dominios magnéticos reside en las paredes de los dominios, que existen siempre que se hallan adyacentes dos dominios magnetizados con distinta orientación. En los nanohilos de las memorias *racetrack* existe una pared de dominio siempre que un 0 se halle contiguo a un 1.

El procedimiento habitual para desplazar paredes de dominio se basa en la aplicación de campos magnéticos. Cada dominio se encuentra realmente magnetizado, porque las orientaciones magnéticas individuales de los átomos que contiene están alineadas. Al sumergirse en un campo magnético externo de intensidad suficiente alineado con uno de los dominios, los átomos antiparalelos que se encuentran en la pared del dominio tenderán a voltear su orientación y alinearse con el campo aplicado, con el consiguiente desplazamiento de la pared del dominio.

Pero este procedimiento no desplaza los bits de datos a lo largo del nanohilo. Imaginemos un 0 emparedado entre un par de unos, y que el campo aplicado apunte en la dirección 1. Las paredes de esos dos dominios se desplazarán, tendiendo a aumentar el tamaño de los dominios 1, hasta acabar por borrar el dominio 0.

El procedimiento espintrónico para desplazar uniformemente las paredes de los dominios a lo largo de su carril consiste en algo tan sencillo como enviar una corriente eléctrica a lo largo del nanohilo. Volvamos a considerar la disposición de dominios 1-0-1. Los espines de los electrones que fluyen a través del primero de los dominios 1 estarán polarizados en la dirección de su propio magnetismo, alineado en la dirección 1. Conforme cada electrón vaya atravesando la pared del dominio 1-0, tenderá a voltear su orientación magnética hacia la dirección 0. Pero el magnetismo del electrón está vinculado a su espín, que es cierta cantidad de la magnitud momento angular. El momento angular, lo mismo que la energía y el momento lineal, es una magnitud conservada. Para que el electrón se voltee y pase de 1 a 0, algo tiene que experimentar el volteo contrario, de 0 a 1, y ese algo es un átomo situado justamente en el lado 0 de la pared del dominio.

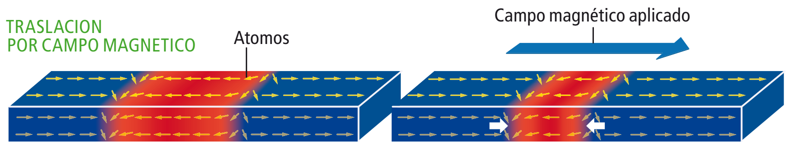
Al ir fluyendo los electrones de espín polarizado a través de la pared del dominio, van desplazándola a lo largo del nanohilo a razón de un átomo por vez.

Veamos ahora qué ocurre cuando uno de estos mismos electrones llega al dominio 0-1 y lo atraviesa. El mismo razonamiento indica que ha de voltearse otra vez de 0 a 1, volviendo con ello a desplazar la pared del dominio una diminuta cantidad a lo largo del hilo en la dirección en que viaja el electrón. Al desplazarse parejamente las dos paredes del dominio, resulta que el bit 0 está viajando a

BITS MOVIDOS POR ESPIN

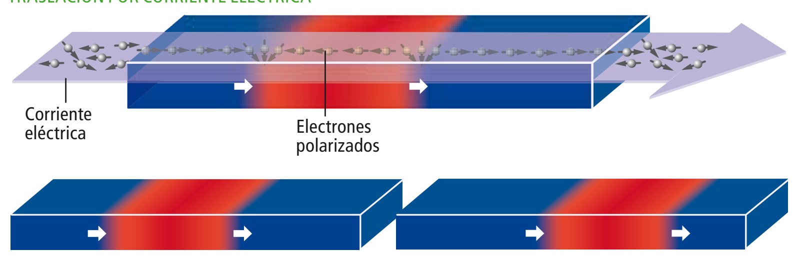
La posibilidad de trasladar dominios magnéticos por un nanohilo mediante una corriente eléctrica es clave para que la memoria *racetrack* constituya una realidad práctica (*abajo*). Técnicas más antiguas, basadas en campos magnéticos, resultarían demasiado complicadas (*arriba*).

TRASLACION POR CAMPO MAGNETICO



Los dominios magnéticos que representan los 0 y los 1 contienen átomos cuyo magnetismo intrínseco (*flechas amarillas*) está alineado. La orientación magnética de estos átomos cambia en las paredes de los dominios. La aplicación de un campo que apunte, por ejemplo, en sentido 1 (*flecha azul*) induce a los átomos de las paredes a orientarse en ese mismo sentido y desplaza las paredes de los dominios (*flechas blancas*), pero lo hace en sentidos opuestos, reduciendo la región 0. El desplazamiento de los bits por el nanohilo requiere, pues, un campo magnético más complicado.

TRASLACION POR CORRIENTE ELECTRICA



Los electrones (*en gris*) que recorren un datódromo adquieren polarización de espín: sus espines y su magnetismo intrínseco se alinean con la magnetización del material. Cuando estos electrones de espín polarizado pasan de una región 1 a una región 0, sus orientaciones magnéticas se voltean. El espín es un momento angular y su cantidad total se ha de conservar en el sistema: cada electrón que conmuta de 1 a 0 ha de invertir un átomo del hilo, de 0 a 1. La corriente de espín polarizado desplaza en sentido longitudinal la pared 1-0 del dominio. Las paredes 0-1 de los dominios se trasladan en un mismo sentido y los bits fluyen por el hilo.

CORTESIA DE IBM (*arriba*); LUCY READING-IKKANDA (*abajo*)

lo largo del hilo, sin expandirse ni contraerse. Hasta el momento, mi grupo ha demostrado en el laboratorio que impulsos de corriente de espín polarizado con duraciones de nanosegundos pueden, en efecto, desplazar en sincronía seis paredes de dominio a lo largo de nanohilos magnéticos. Las paredes de los dominios pueden desplazarse 150 nanómetros en un nanosegundo, lo que permite tiempos de acceso medibles en nanosegundos, millones de veces menores que en los discos duros, es decir, a velocidades equiparables a las de las memorias volátiles.

No obstante, las paredes de los dominios podrían fácilmente moverse a la deriva, impulsados, tal vez, por pequeñas corrientes de fuga o campos magnéticos erráticos, o porque los impulsos de control no posean la intensidad o la duración correctas.

Para evitar el riesgo, se graba pequeñas muescas en los costados de los datódromos separadas por distancias iguales al tamaño deseado para los bits. Las paredes de los dominios tienden a quedar enclavadas en estas muescas, porque en ellas tendrán área mínima y, por consiguiente, mínima energía. Para desplazarlas es preciso realizar un trabajo, y las diminutas pequeñas corrientes de fuga que pudiera haber no tendrían la energía suficiente, mientras que los impulsos de control, aunque sean ligeramente imperfectos, seguirán pudiendo desplazar la pared desde una muesca a la siguiente: ni más allá, ni más acá.

Pueden presentarse unos pocos tipos de pared de dominio. Las paredes transversales, bastante sencillas, se parecen mucho al tipo de pared que seguramente está imaginando, a la vista de la explicación anterior. Las paredes en vórtice, por el contrario, exhiben un patrón de magnetización en torbellino, con un pequeño "núcleo" en su centro. El desplazamiento de paredes en vórtice se logra con corrientes de menor intensidad, porque el núcleo arrastra consigo toda la pared. Si los dominios correspondientes al 0 y al 1 se hallan magnetizados perpendicularmente al carril por donde han de correr en lugar de estarlo paralelamente a él, se produce sólo un tipo de dominios, relativamente sencillo. En principio, esta clase de magnetización debería ofrecer ventajas, pues la pista puede ser más estrecha y las corrientes necesarias para desplazar las paredes, de menor intensidad.

Organizados los datódromos en columnatas que se elevasen sobre una oblea de silicio, el dispositivo de memoria tendría un carácter tridimensional y la densidad de almacenamiento de datos se multiplicaría en comparación con la del diseño horizontal. En cambio, tanto los discos magnéticos como las memorias (y dispositivos lógicos) basados en la microelectrónica de silicio son esencialmente bidimensionales; muchos pronostican que su evolución hacia dimensiones cada vez menores tropezará en unos diez años con limitaciones fundamentales.

Mi grupo ha construido algunos de estos datódromos verticales, pero todavía no hemos integrado en un mismo chip los dispositivos de lectura o grabación de las paredes de dominios. La construcción a un coste viable de datódromos verticales en chips de silicio puede suponer un problema. Casi todos los experimentos de mi grupo se han realizado con nanohilos implantados horizontalmente sobre el silicio. La capacidad de esta modalidad de memoria *racetrack* sería equiparable a la de la memoria flash, aunque contaría con ventajas: sería mucho más rápida, consumiría menos energía y no envejecería. Estamos trabajando en un prototipo que aprovecharía nuestra capacidad de desplazar seis de paredes de dominio en cada datódromo.

La memoria *racetrack* se enfrenta a la competencia de otros dispositivos en desarrollo más tradicionales (*véase el recuadro* "Memorias en gestación"). Está por ver cuál será el primero que llegue a las tiendas.

Memorias en gestación

A fin de lograr memorias de gran capacidad y permanencia, se están investigando varias técnicas que disponen los bits en formaciones horizontales sobre una oblea de silicio; se trata de métodos más tradicionales que la memoria *racetrack*. Para alcanzar capacidades equiparables a las de las memorias *racetrack* verticales o de los discos duros se necesitaría apilar muchas formaciones así.

RRAM (memoria resistiva de acceso aleatorio) Se utilizan materiales de resistencia conmutable entre dos o más estados bien diferenciados. Muchas compañías estudian sistemas basados en nanoestratos metal-óxido y conmutación por impulsos eléctricos. Al parecer, los campos eléctricos de estos impulsos producen filamentos conductores a través del óxido aislante. HP Labs tiene la intención de lanzar en este mismo año prototipos basados en memristores, en los que la variación de resistencia se debe a la migración de átomos de oxígeno.

PRAM (memoria de acceso aleatorio por cambio de fase) Sus elementos de memoria se basan en vidrios de calcogenuro, el material que se usa en los CD y DVD regrabables. Ese tipo de vidrio conmuta entre un estado cristalino, de poca resistencia, y un estado amorfo, de resistencia elevada. Determina el estado del material un impulso eléctrico que calienta el calcogenuro y deja después que se enfríe rápida o lentamente. BAE Systems presentó en 2006 una PRAM de 512 kilobytes reforzada frente a radiaciones y destinada a aplicaciones en el espacio. Numonyx, una filial de Intel Corporation y ST Microelectronics, empezó a comercializar su chip "Alverstone", de 16 megabytes, a finales de 2008.

STT-RAM (memoria de acceso aleatorio por transferencia de momento angular) Una categoría nueva de memoria magnética de acceso aleatorio (MRAM). La MRAM conserva datos en la orientación magnética de cada bit. En la MRAM habitual, los bits se implantan mediante campos magnéticos nanoscópicos, pero la STT-RAM se vale de corrientes con espín polarizado, lo que permite que los bits sean de menores dimensiones y consuman menos energía. Entre las compañías que están desarrollando STT-RAM se cuentan Ever-Spin, Grandis, Hynix, IBM, Samsung, TDK y Toshiba.

Bibliografía complementaria

MAGNETICALLY ENGINEERED SPINTRONIC SENSORS AND MEMORY. Stuart Parkin, Xin Jiang, Christian Kaiser, Alex Panchula, Kevin Roche y Mahesh Samant en *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, n.º 5, págs. 661-680; mayo de 2003.

MAGNETIC DOMAIN-WALL RACETRACK MEMORY. Stuart S. P. Parkin, Masamitsu Ayashi y Luc Thomas en *Science*, vol. 320, págs. 190-194; 11 de abril, 2008.

Fermi, Pasta, Ulam y el nacimiento de la matemática experimental

Hace 54 años, Enrico Fermi, John Pasta y Stanislaw Ulam informaron de un experimento numérico que todavía hoy sigue alentando nuevos descubrimientos

Mason A. Porter, Norman J. Zabusky, Bambi Hu y David K. Campbell

Hace cuatro años, en 2005, científicos de todo el mundo conmemoraron el centenario del *annus mirabilis* de Einstein (1905), el año en que publicó trabajos asombrosos sobre el efecto fotoeléctrico, el movimiento browniano y la relatividad especial, golpes de genio que remodelaron la faz de la física. Curiosamente, el año 2005 correspondía también a otro importante aniversario en la física que ha pasado inadvertido para el público.

Cincuenta años antes, en mayo de 1955, el Laboratorio Científico de Los Alamos (como era conocido a la sazón) dio a conocer el informe técnico LA-1940, titulado "Studies of Nonlinear Problems: I" (Estudio de problemas no lineales: Parte I). Eran sus autores Enrico Fermi, John Pasta y Stanislaw Ulam, y los resultados expuestos en ese texto han venido sacudiendo al mundo científico desde entonces. No hay, en verdad, exageración al afirmar que el problema FPU, nombre que universalmente recibe en nuestros días el sistema que estudiaron Fermi, Pasta y Ulam, ha puesto en marcha una revolución en la ciencia moderna.

Una vez tras otra

Ulam, en su introducción a la versión de LA-1940 publicada en las obras completas de Fermi en 1965, escribió que éste llevaba largo tiempo fascinado por un misterio fundamental de la mecánica estadística, "la flecha del tiempo". Imaginémonos que filmamos la colisión de dos bolas de billar: ruedan una hacia la otra, chocan y salen disparadas en distintas direcciones. Pasemos ahora la película en sentido retrógrado. El movimiento de las bolas resulta completamente natural. ¿Y por qué no habría de ser así? Las leyes de Newton, las ecuaciones que gobiernan el movimiento de las bolas, operan igual para ambas posiciones iniciales y para tiempos positivos o negativos.

Pero imaginemos ahora el comienzo de una partida de billar americano, con las 15 bolas de color perfectamente encajadas en un marco triangular y la bola blanca disparada contra ellas para dispersarlas por toda la mesa. Si filmamos la colisión y el caos consiguiente, nadie que haya tenido en sus manos un taco de billar podría pensar que la película se está pasando en el sentido de avance si se está proyectando hacia atrás; las bolas nunca recuperarían por sí solas su disposición triangular inicial. Y sin embargo, las leyes que gobiernan todas las colisiones siguen siendo las mismas que en el caso del choque de dos bolas. ¿Qué es, entonces, lo que confiere a la flecha del tiempo su sentido?

Por razones que más adelante comentaremos con mayor detalle, Fermi opinaba que la clave residía en la no linealidad, el apartarse los egresos de un sistema físico de la linealidad, o proporcionalidad con respecto a las señales de

CONCEPTOS BASICOS

- Fermi, Pasta y Ulam fueron los primeros en emplear un ordenador para explorar el comportamiento de un sistema físico, aparentemente sencillo pero inabordable con los métodos analíticos ordinarios.
- Se trataba de una cadena de masas unidas por muelles cuya fuerza de recuperación no era proporcional a su estiramiento.
- La complejidad de ese sistema derivaba de su no linealidad. Desde entonces, con diversas variantes, ha seguido siendo fuente de múltiples lecciones sobre la física de la complejidad.

1. **EN EL RIO SEVERN, EN INGLATERRA, se puede practicar el surf, porque, periódicamente, su amplio estuario recibe mareas excepcionalmente altas que crean macareo, olas que remontan el río. Las ondas que siguen al frente inicial conservan su forma durante muchos kilómetros, lo que permite a los surfistas cabalgadas larguísimas. Tales ondas no dispersivas se presentan en otros numerosos sistemas físicos, entre ellos un sistema de masas y muelles de apariencia engañosamente simple, que Enrico Fermi, John Pasta y Stanislaw Ulam estudiaron en 1955 mediante experimentación numérica en una computadora del Laboratorio Científico de Los Alamos. Aquella investigación abrió las puertas al descubrimiento asistido por ordenador. Ha influido profundamente en numerosos campos de la ciencia y de las matemáticas.**

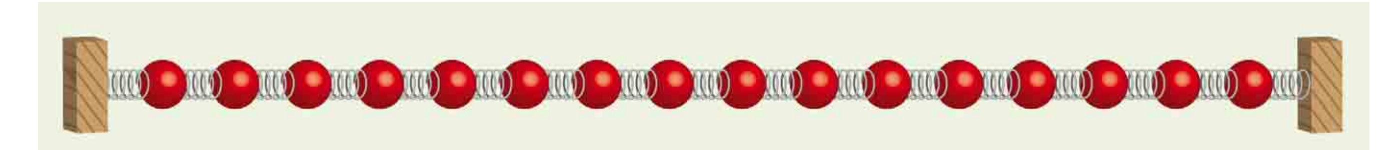
AFEW LTD. MARK HUMPAGE PHOTOGRAPHY/*American Scientist*

entrada. Sabía que el cálculo de las soluciones de unas ecuaciones de movimiento no lineales sería demasiado complicado para hacerlo con lápiz y papel.

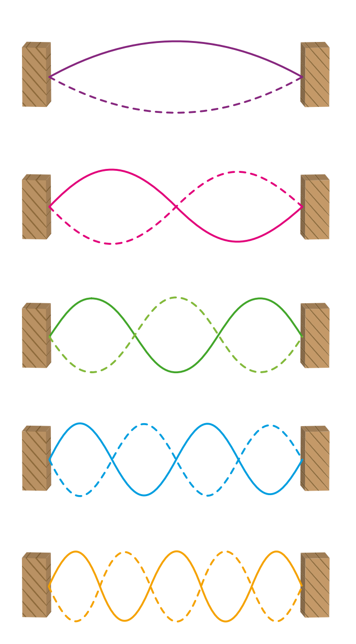
Por fortuna, como a principios de los años cincuenta se hallaba en Los Alamos, pudo usar una de las primeras computadoras digitales. Los científicos de Los Alamos la habían bautizado humorísticamente con el acrónimo MANIAC (MAthematical Numerical Integrator And Computer). Realizaba cómputos numéricos mediante la "fuerza bruta" y resolvía así problemas (concernientes, en su mayor parte, a investigaciones secretas sobre armamento nuclear) que de otra forma habrían resultado imposibles de analizar. El problema FPU fue una de las primeras investigaciones no secretas que se efectuaron con el MANIAC; con él se inauguró la que a veces se ha dado en llamar "matemática experimental".

La expresión "matemática experimental" puede parecer contradictoria. Todo el mundo sabe que la validez de las matemáticas es independiente de lo que acontezca en el mundo físico o material. Sin embargo, a la investigación original de FPU se le puede asignar razonablemente el acta de nacimiento de la matemática experimental, si ésta es entendida como método para investigar de forma numérica, con ordenadores, problemas matemáticos o físicos refractarios, por su complejidad, a métodos de análisis más tradicionales.

En nuestros días, los estudios computacionales de problemas complejos (no lineales, por lo general) son tan frecuentes cuan fundamentales. El ordenador ocupa un legítimo puesto al lado de la experimentación física y del análisis teorético, y sirve de instrumento para el estudio de una miríada de fenómenos en la ciencia, la ingeniería y las propias matemáticas. Han sido realizadas ya, con ayuda de ordenadores, demostraciones matemáticas



2. FERMI, PASTA Y ULAM MODELIZARON MATEMATICAMENTE una serie de masas interconectadas por resortes. Las masas se mueven hacia un lado y otro a lo largo de la recta que las conecta, y obedecen a la ley de movimiento de Newton, *f* = *ma* (fuerza igual a masa por aceleración). En este caso, las fuerzas que intervienen son las de recuperación que ejercen los muelles. Lo que confiere a aquel estudio tanta novedad y fascinación es que las fuerzas de recuperación son no lineales, es decir, no son directamente proporcionales a la elongación o compresión de los muelles.



3. FERMI, PASTA Y ULAM CONJETURABAN que la energía de su sistema de masas y muelles acabaría repartida equitativamente entre sus diferentes modos de movimiento, que son análogos a los de vibración de una cuerda de violín pulsada. En una cuerda tensa, el modo fundamental de vibración (*color violeta*) corresponde a la nota que oímos. Los modos vibratorios de frecuencias más elevadas corresponden a los diversos armónicos de esa nota. Los aquí mostrados corresponden al segundo armónico (*color lila*), al tercero (*en verde*), al cuarto (*azul*) y al quinto (*color anaranjado*).

rigurosas, como es el caso del "problema de los cuatro colores". En mecánica de fluidos, las visualizaciones informáticas de complejos flujos dependientes del tiempo han resultado cruciales para extraer los mecanismos físicos que les subyacen. La interpretación de experimentos en física de materia condensada, de las observaciones de la astrofísica o de los datos proporcionados por la bioinformática hubiera sido totalmente imposible sin ayuda de ordenadores. Mucho se ha avanzado desde el estudio FPU y, bajo esta luz, resulta especialmente importante comprender cómo se desarrolló aquel trabajo seminal.

Fermi, con Pasta y Ulam, propuso investigar lo que él presumía que sería un sistema dinámico no lineal muy simple: una cadena de masas interconectadas por muelles, que sólo pudieran desplazarse en uno u otro sentido por la recta definida por la cadena. El conjunto idealizado de masas y muelles de FPU no experimentaba fricción ni calentamiento interno, es decir, no sufría pérdidas de energía, por lo que podía oscilar eternamente. Sin embargo, los muelles de este sistema teórico no eran del tipo que se estudia en los cursos elementales de física: la fuerza de recuperación *no era* proporcional a su elongación o compresión. En el problema FPU intervenían componentes no lineales en la relación matemática entre la medida de la deformación y la fuerza de recuperación resultante.

La cuestión clave que FPU deseaban estudiar consistía en determinar cuánto tardarían las oscilaciones de la ristra de masas y muelles no lineales en alcanzar el equilibrio. El equilibrio que esperaban era similar al equilibrio térmico de un gas. En los gases monoatómicos, como el helio, alcanzado el equilibrio, la energía térmica (cinética) de las moléculas se encuentra repartida por igual entre las tres posibles componentes, paralelas a los ejes x, y o z, que puede tener su movimiento. Alcanzado el equilibrio, no habrá, por ejemplo, más átomos rebotando arriba o abajo que hacia la izquierda o la derecha.

La equitativa repartición de la energía entre los diferentes modos de movimiento es de carácter fundamental. Se puede generalizar ese principio, conocido como *teorema de equipartición* en la mecánica estadística, para dar cabida a moléculas más complicadas que las del helio —asimiladas éstas a bolas de billar— que puedan repartir también su energía en movimientos de vibración o de rotación. La aplicación del teorema de equipartición permite el cálculo de magnitudes —por ejemplo, la capacidad calorífica de un gas— a partir de los fundamentos de la teoría.

La premisa de FPU consistía en suponer que podían poner en marcha su sistema con las masas en sólo un modo sencillo de oscilación. Si los muelles del sistema fuesen lineales (sin fuerzas de amortiguación), ese modo proseguiría indefinidamente. Pero con muelles no lineales pueden quedar excitados diferentes modos de oscilación. El trío FPU esperaba que al transcurrir el tiempo el sistema se "termalizaría", es decir, que las masas en vibración acabarían repartiendo por igual su energía entre los distintos modos de oscilación posibles para ese sistema.

La visualización de los posibles modos de oscilación resulta un poco difícil para la hilera de masas del sistema FPU; en cambio, sí es sencillo comprender cómo surgen los diferentes modos de vibración al pulsar, digamos, la cuerda de un violín. Uno de los modos corresponde al tono fundamental, en el cual la cuerda tiene un desplazamiento máximo hacia arriba y abajo en su punto medio; va siendo progresivamente menor hacia los extremos fijos. Otro modo es el primer armónico (una octava más agudo), en el cual una mitad de la cuerda se está moviendo hacia arriba mientras la otra mitad lo hace hacia abajo, y así sucesivamente. Una cuerda tensa tiene una infinidad de modos de vibración, pero el sistema de FPU consta sólo de un número finito de modos (igual al número de masas del sistema).

Para realizar su estudio, FPU (juntamente con Mary Tsingou, la cual, aunque no figura en la autoría del informe, efectuó importantes aportaciones a la investigación) consideraron diferentes números de masas (16, 32 o 64) en sus experimentos computacionales. Luego, resolvieron numéricamente las ecuaciones no lineales acopladas que gobiernan el movimiento de las masas. (Estas ecuaciones se deducen de la función no lineal del muelle

BARBARA AULICINO/*American Scientist*

y de la famosa ley de Newton, $f = ma$.) Así, FPU utilizaron el MANIAC para computar el comportamiento del sistema en tiempos correspondientes a un número muy grande de períodos del modo fundamental en el que había sido lanzado el sistema. Los resultados les dejaron asombrados.

Al principio, la energía se hallaba repartida entre varios modos distintos. Más tarde (en tiempo simulado), su sistema retornó a una situación que parecía ser la de su estado de partida. De hecho, el 97 por ciento de la energía del sistema llegó a serle reintegrada al modo que habían preparado inicialmente. ¡Era como si las bolas de billar se hubieran reagrupado mágicamente desde su estado de dispersión hasta formar el triángulo perfecto del que partieron!

No todos se quedaron convencidos con estos cálculos. Una de las conjeturas más populares afirmaba que FPU no había hecho funcionar las simulaciones durante el tiempo suficiente, o tal vez el tiempo requerido para lograr la equipartición de energía en el sistema FPU era demasiado largo para poder ser observado numéricamente. Sin embargo, en 1972 otro físico de Los Alamos, James L. Tuck, y Tsingou (que por entonces utilizaba apellido de casada, Menzel) dieron fin a estas dudas efectuando simulaciones numéricas sumamente arduas que hallaron recurrencias a escalas temporales tan grandes, que a veces se las denomina "superrecurrencias". Esta investigación puso de manifiesto que la equipartición de energía no le había quedado oculta a FPU a causa de simulaciones computarizadas demasiado breves: algo mucho más interesante había tomado cuerpo.

1 + 1 = 3

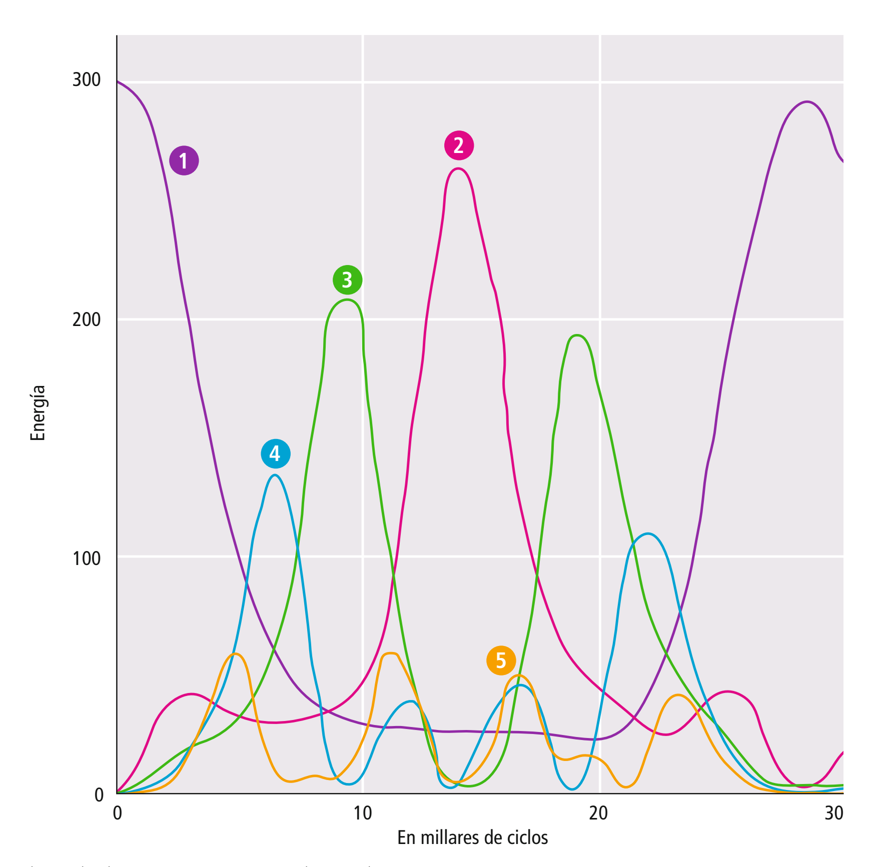
¿Por qué pensaban FPU que la no linealidad de los muelles iba a garantizar una equipartición de energía en su experimento? Y en todo caso, ¿en qué consiste esa extraña noción de no linealidad? Evidentemente, el término alude al abandono de la linealidad, que hasta ahora hemos presentado tan sólo como una proporcionalidad entre las entradas y las salidas de un sistema.

Los estudiantes de física apenas si ven otra cosa que sistemas lineales en los cursos introductorios. Su comprensión y análisis son mucho más sencillos. Al conectar una masa a un muelle lineal, el comportamiento posterior es muy simple: oscilará hacia delante y atrás a la frecuencia de resonancia del sistema, que depende sólo de la masa y de la constante elástica del muelle (el coeficiente que relaciona su elongación o compresión con la fuerza de recuperación). Pero cuando el muelle no es lineal, las cosas se complican bastante. Por ejemplo, la frecuencia de oscilación depende de la amplitud. Démosle a la masa un leve empujoncito, y el sistema oscilará a una frecuencia; golpeémosla con fuerza, y oscilará a otra.

Cuando se empieza a estudiar física, es fácil recibir la impresión de que los sistemas no lineales son más bien anómalos. En realidad, las interacciones no lineales son mucho más características del mundo real que las lineales. Por esta razón, hay quienes dicen que "ciencia no lineal" tiene el mismo sentido que hablar de "zoología no proboscídea" (broma que a veces se le atribuye, indebidamente, a Ulam).

¿En qué se diferencian los sistemas no lineales de los que sí lo son, aparte de contar con frecuencias de oscilación dependientes de la amplitud? En un sistema lineal, al duplicar el ingreso, se duplicará el egreso. Supongamos que alguien alza el doble la fuerza de su voz en el micrófono de un karaoke: los altavoces emitirán su voz con doble intensidad. Análogamente, si se canta a dúo, el egreso conjunto será la suma (la "superposición") de lo que habría resultado si cada voz hubiera interpretado su parte por separado. Además, si todo el sistema es verdaderamente lineal, las voces no sufrirán distorsión. Las frecuencias que resulten (es decir, las notas que se oigan) serán exactamente las mismas que el dúo introdujo, con independencia de su amplitud.

En el caso de los sistemas no lineales, todo se complica mucho. Por ejemplo: el principio



4. AL INICIALIZAR SU SISTEMA, Fermi, Pasta y Ulam asignaron toda la energía al modo de vibración de más baja frecuencia (*1*) y calcularon lo que habría de suceder. Presumían que la energía acabaría repartiéndose por igual entre todos los modos de vibración posibles. Lo que observaron, en cambio, fue que la energía, tras ser compartida entre unos pocos modos de orden bajo, retornaba más tarde, en un porcentaje muy grande, al modo utilizado para poner en marcha el sistema. (Los colores se corresponden con los modos análogos de la figura 3.) Esta observación, a la que calificaron modestamente de "pequeño descubrimiento", señala el nacimiento de la matemática experimental.

BARBARA AULICINO, ADAPTADO DE FERMI, PASTA Y ULAM, 1955/*American Scientist*

CHRIS EILBECK, UNIVERSIDAD HERIOT-WATT/*American Scientist*

5. EL INGENIERO JOHN SCOTT RUSSELL observó en los años treinta del siglo XIX, en el Union Canal de Escocia, una ola singular: no se dispersaba de la manera habitual, sino que conservaba su forma al progresar por el canal. Fueron necesarios más de cien años para que se comprendiera que este fenómeno es resultado de efectos no lineales que compensan la dispersión esperada. Uno de los autores (Zabusky) y el matemático Martin Kruskal acuñaron el término *solitón* para describir una onda de este tipo, que puede presentarse en una variedad de sistemas físicos. En esta fotografía, tomada en 1995, se muestra una tentativa de recrear en el Union Canal la ola de Russell. Sólo obtuvo un éxito parcial.

de superposición deja de ser válido. Además, las frecuencias emitidas no son exclusivamente las ingresadas. Al gritar con fuerza en el micrófono del karaoke, el amplificador puede quedar sobrecargado y entrará en un régimen no lineal. Los altavoces emiten entonces sonidos fuertemente deformados, que contienen frecuencias que no se habían cantado. Y también tienen lugar otros efectos mucho más sutiles.

Uno de los efectos sutiles de la física no lineal fue observado en los años treinta del siglo XIX. John Scott Russell, un joven ingeniero, había sido contratado para que investigase la forma de mejorar las barcazas del Union Canal, cercano a Edimburgo. Por accidente, una de las sogas de sirga de una barcaza se rompió. Russell describió así lo sucedido: "Hallábame observando el movimiento de un bote que estaba siendo remolcado rápidamente por un canal estrecho, tirado por un par de caballos, cuando el bote se detuvo de pronto, pero no así la masa de agua que el bote había puesto en movimiento; se acumuló en torno a la proa de la embarcación en un estado de violenta agitación; entonces, de repente, la dejó atrás y salió lanzada hacia delante a gran velocidad, adoptando la forma de una elevación grande y solitaria, un apilamiento de agua, redondeado, liso y nítidamente definido, que prosiguió su curso por el canal sin que, al parecer, cambiase de forma o perdiera velocidad. Yo la seguí a caballo, y la adelanté cuando todavía avanzaba a unas ocho o nueve millas (unos 14 km) por hora, conservando su figura inicial, que medía unos treinta pies (9 metros) de largo y entre un pie y un pie y medio (entre 30 y 45 cm) de alto. Su altura fue disminuyendo gradualmente, y tras una persecución de un par de millas (3 km) la perdí de vista entre los recodos del canal".

Esa extraña ondulación no se comportó como las olas de la superficie del mar. Estas (y otras muchas clases de las ondas que nos son familiares) viajan a velocidades que dependen de su longitud de onda, fenómeno al que se denomina dispersión. Una perturbación como la creada ante la barcaza de Russell puede ser entendida como una superposición de ondas puramente sinusoidales, de distinta longitud de onda cada una. Sin embargo, si en el mar abierto se crea una perturbación compacta, cada una de las ondas componentes viajará a una velocidad diferente y, en consecuencia, la perturbación inicial no mantendrá su forma. Una tal onda se elongaría y deformaría.

Russell, que poseía una mente inquisitiva, se empeñó en estudiar su descubrimiento mediante experimentos controlados, en laboratorio, y en una publicación de 1844 cuantificó el fenómeno que había descubierto. Exponía en ella, por ejemplo, que en un canal las ondas solitarias de gran amplitud se desplazan a mayor velocidad que las pequeñas: un efecto no lineal.

El físico holandés Diederick Korteweg y su discípulo Gustav de Vries dedujeron en 1895 una ecuación en derivadas parciales, no lineal, conocida hoy por ecuación Korteweg-de Vries (KdV), la cual, sostenían, podía describir los resultados de los experimentos de Russell. Esta ecuación expresa que la tasa de cambio en el tiempo de la altura de la onda está gobernada por la suma de dos términos: uno no lineal (responsable de que las velocidades dependan de la amplitud) y otro lineal (responsable de la dispersión dependiente de la longitud de onda). En particular, Korteweg y de Vries descubrieron una solución en onda solitaria que se correspondía con la extraña ola que Russell había perseguido a caballo. Esta solución es fruto de un equilibrio entre no linealidad y dispersión. Los físicos holandeses hallaron asimismo otra solución periódica de su ecuación, pero no lograron obtener soluciones generales.

Tanto su trabajo como las observaciones de Russell cayeron en el olvido y hasta principios de los años sesenta fueron dejadas de lado por los matemáticos, físicos e ingenieros que estudiaban las ondas acuáticas. Por entonces, uno de los autores (Zabusky) y Martin Kruskal (fallecido), de la Universidad de Princeton,

comenzaron a estudiar las cadenas FPU. Aunque partieron del modelo FPU, se valieron, en esencia, de masas y muelles infinitesimalmente pequeños, al objeto de representar una línea continua de material deformable, en lugar de una serie de masas individualizadas y discretas. Esta metodología les permitió examinar situaciones con grandes longitudes de onda y proporcionó una ecuación en derivadas parciales pareja a la habitual que describe las ondas lineales, con la salvedad de que modificaba la dispersión.

Kruskal, con la intención de representar en el sistema ondas progresivas, dedujo a partir de esta ecuación otra, que, como Kruskal y Zabusky comprendieron más tarde, resultaba ser la ecuación KdV. No parecía susceptible de tratamiento analítico; por eso, con la ayuda de Gary Deem, perteneciente entonces a los Laboratorios Bell, se valieron de simulaciones numéricas para observar una cuasirrecurrencia a las condiciones iniciales. En la descripción de sus soluciones de la ecuación KdV, inventaron para el fenómeno de la onda solitaria una palabra que llegaría a ser de uso común: *solitón*.

El trío descubrió que los solitones podían evolucionar desde un estado inicial y viajar después hacia la derecha y hacia la izquierda hasta intercambiar sus posiciones relativas y volver a enfocarse, casi exactamente, en otro lugar del espacio. Este trabajo (y el de muchos investigadores posteriores) ha aportado múltiples avances, teoréticos y experimentales, en una miríada de campos de las matemáticas y de la física.

Mientras Zabusky, Kruskal y Deem andaban ocupados con el problema FPU, un físico-matemático japonés, Morikazu Toda, investigaba un problema no lineal parecido y demostraba matemáticamente que nunca llegaría a mostrar caos alguno. La cadena FPU encerraba, sin duda, grandes sutilezas.

¿Lacayos del caos?

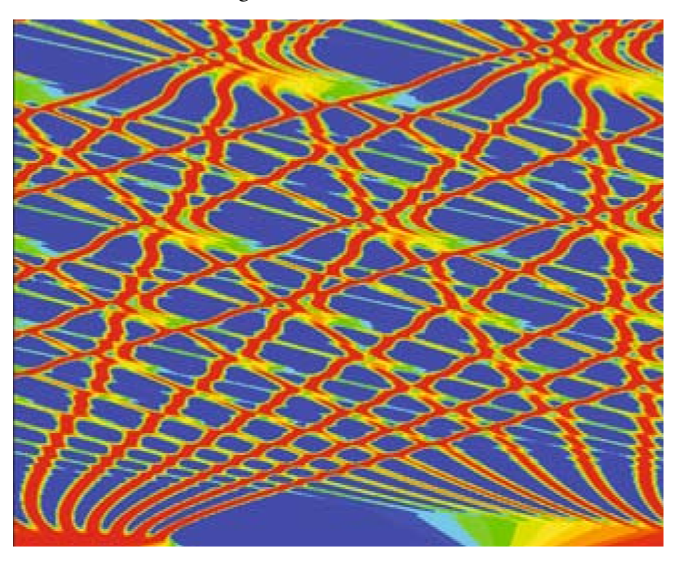
Las ondas solitarias pueden realmente engendrar comportamientos de una regularidad sorprendente, pero el movimiento de un sistema FPU puede también ser caótico en grado sumo. De hecho, incluso sistemas dinámicos muy sencillos pueden dar lugar a intrincadas combinaciones de comportamientos caóticos y regulares.

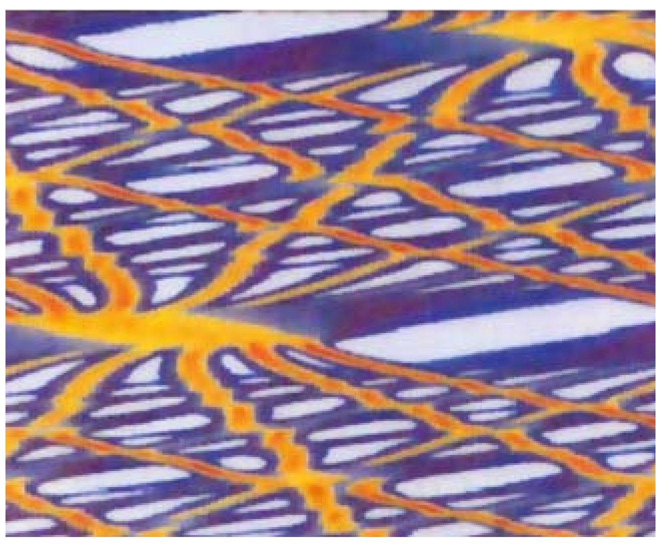
Estamos utilizando aquí el término *caótico* en su sentido científico. No se trata de aleatoriedad. El egreso de un problema FPU está regido por las leyes de Newton, que determinan inequívocamente todo movimiento futuro: no hay lugar para acontecimientos aleatorios. No obstante, al cabo de poco, los movimientos pueden parecer sumamente desordenados y erráticos. Además, el sistema de masas y muelles ofrece, luego de un lapso de tiempo, una enorme sensibilidad a las condiciones iniciales. Modifíquense éstas, por poco que sea, y transcurrido algún tiempo el resultado habrá sido completamente diferente.

Muchos sistemas —entre ellos, las variaciones atmosféricas responsables de los cambios meteorológicos— presentan esa propiedad; en consecuencia se los considera caóticos, a pesar de que su evolución a lo largo de un período breve pueda parecer razonablemente regular. De hecho, como hace ver el propio problema FPU, su movimiento, a lo largo de períodos de tiempo enormemente largos, ¡puede ser francamente regular!

Para determinar si (dadas ciertas condiciones iniciales) el movimiento de un determinado sistema es, a largo plazo, regular o caótico, resulta conveniente representar gráficamente la evolución del sistema en el transcurso del tiempo. La dificultad estriba en que incluso en un sistema dinámico de apariencia sencilla, que conste de una sola masa, hay que representar seis variables, a saber, tres coordenadas espacia-

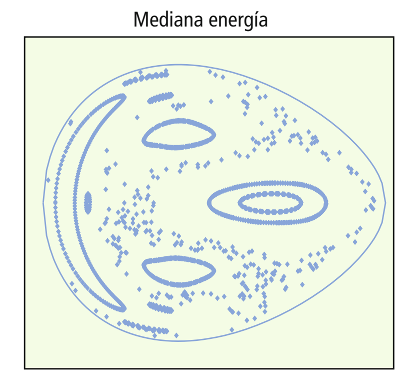
6. UN SISTEMA ANALOGO AL MODELIZADO por Fermi, Pasta y Ulam, pero compuesto esta vez por 256 masas (*a la izquierda*), origina solitones fácilmente. Estos pueden propagarse en cualquiera de las dos direcciones, intercambiar sus posiciones y acabar devolviendo el sistema a un estado similar al de su configuración inicial. Se puede apreciar en esta fotografía el movimiento de los solitones siguiendo las líneas de color cálido, que denotan grandes desplazamientos de las masas. El eje horizontal corresponde a la posición a lo largo de la serie de muelles y masas. El eje vertical corresponde al tiempo: comienza abajo y progresa en sentido ascendente. La aparición de solitones en propagación no exige que las masas sean discretas; se da también en analogías continuas del sistema Fermi-Pasta-Ulam (*a la derecha*).

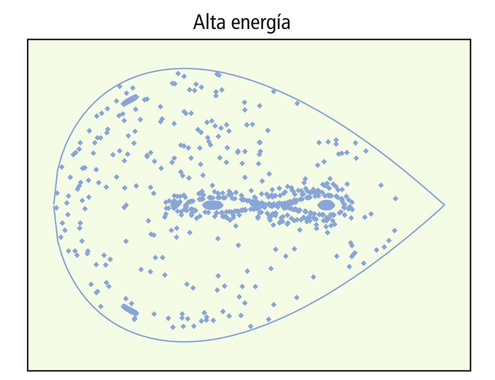




LA IMAGEN DE LA IZQUIERDA SE DEBE A ZABUSKY, SUN Y PENG (2006) MEASURES OF CHAOS AND EQUIPARTITION IN INTEGRABLE AND NONINTEGRABLE LATTICES en *Chaos*, VOL. 16, PAG. 013130. LA IMAGEN DE LA DERECHA ES DE ZABUSKY

Baja energía





7. LAS INTERACCIONES CAOTICAS hubieran contribuido a engendrar el reparto de energía que Fermi, Pasta y Ulam esperaban hallar. Pero no impartieron a su sistema la energía suficiente para que se diera la equipartición. La conexión con el caos puede ilustrarse con un sistema (matemáticamente equivalente a la cadena de tres masas de Fermi-Pasta-Ulam) estudiado por los astrónomos Michel Hénon y Carl Heiles en 1963. El comportamiento del sistema Hénon-Heiles se aprecia mejor mediante secciones de Poincaré, que muestran los puntos donde las trayectorias multidimensionales del sistema intersecan a un plano seleccionado. Al ir aumentando la energía total del sistema se observa una progresión desde trayectorias regulares (*a la izquierda*) hasta otras que reflejan tanto comportamientos regulares como caóticos (*centro*) y, finalmente, hasta trayectorias caóticas en su mayor parte (*a la derecha*).

BARBARA AULICINO, ADAPTADO DE J. S. KOLE, 1999/*American Scientist*

les, *x*, *y*, *z*, y las correspondientes componentes (otras tres) de la velocidad en la dirección de cada uno de los tres ejes.

La representación de los seis valores correspondientes a esta masa en movimiento, conforme va trazando su trayectoria por el espacio, crea figuras visualmente embrolladas, de difícil interpretación. No obstante, si se representa sólo un subconjunto de puntos inteligentemente seleccionados (puntos que verifiquen, por ejemplo, una condición de interés físico, como la anulación de alguna de las componentes de la velocidad) resulta más sencillo interpretar lo que sucede. Tales representaciones se denominan "secciones de Poincaré" en honor del gran físico y matemático francés Jules Henri Poincaré.

Las trayectorias regulares son tan predecibles como las órbitas de los planetas o los atascos para ir al trabajo. Es posible irles siguiendo la pista a lo largo del tiempo con gran precisión. Por otra parte, las trayectorias caóticas propenden a ser sumamente irregulares. Tienden a vagabundear erráticamente, como un grupo de beodos; sólo están constreñidas por la energía de que disponen.

El caos reviste importancia en el problema FPU, porque si es suficiente, podría mezclar energías entre modos de oscilación. Esto es, en un sistema tal, el caos puede provocar la repartición de energía. Aunque ni FPU ni Tuck y Menzel habían observado equipartición, Zabusky y Deems, en su estudio de 1967, sí la apreciaron, tras realizar simulaciones de un sistema FPU para el cual los movimientos iniciales de las masas tenían pequeña longitud de onda y gran amplitud. En 2006 otros investigadores, en análisis y simulaciones de mayor alcance, confirmaron esta equipartición.

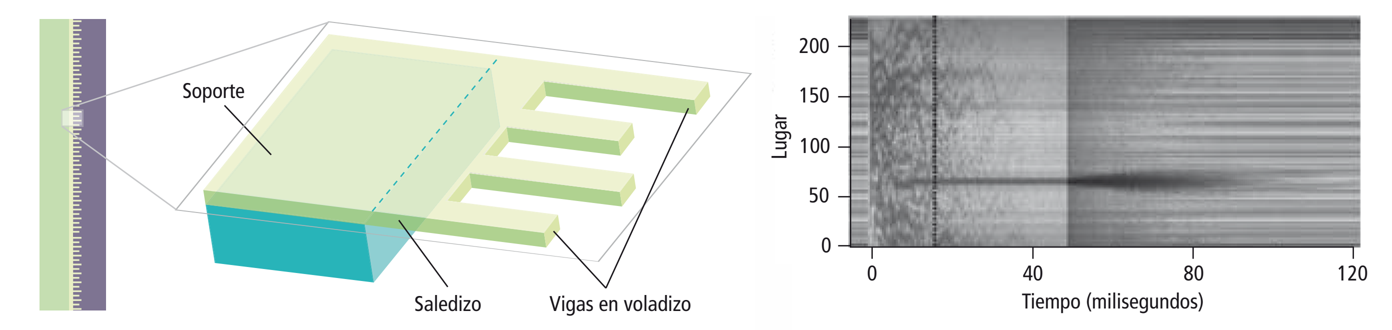
Eddie Cohen, de la Universidad Rockefeller, y varios colaboradores, prosiguiendo y desarrollando trabajos de Boris Chirikov sobre caos y equipartición energética, han investigado recientemente el sistema FPU a grandes energías. Al examinar esta cuestión sistemáticamente, demostraron la existencia de dos umbrales (expresados en función de la energía por oscilador) en la dinámica del sistema FPU. En el primer umbral, el movimiento pasa de ser completamente regular a débilmente caótico: se presenta cierto comportamiento caótico, pero las cosas siguen todavía desarrollándose con mucha regularidad durante una parte abrumadoramente grande del tiempo. Pero superado un segundo umbral, de energía más elevada, se instaura un caos vigoroso, que permite una rápida repartición de energía entre modos.

Cohen y sus colaboradores descubrieron también que la equipartición acontece más deprisa al aumentar el número de masas. Si el número de osciladores no lineales tiende a infinito (es decir, en las situaciones de la vida real que FPU deseaban modelizar), la equipartición se presenta, cualquiera que sea la energía que se le aporte al sistema. Las condiciones iniciales que FPU utilizaron en sus simulaciones numéricas se encontraban, sin embargo, por debajo del umbral del caos, lo que les impidió observar la equipartición de energía entre los diferentes modos de oscilación. FPU hubieran observado tal equipartición si hubieran supuesto, o bien no linealidades más intensas (que provocan interacciones más acusadas entre diferentes modos), o impulsos iniciales más energéticos. Hemos de agradecer que no lo hicieran, en vista del interés que suscitó su problema y las muchas enseñanzas extraídas del mismo.

Podemos observar un ejemplo en los estudios sobre la conducción del calor. (La transmisión del calor fue una de las cuestiones que movieron a FPU.) A comienzos del siglo XIX,

Los autores

Mason A. Porter, doctorado por la Universidad Cornell en 2002, enseña matemática aplicada en el Colegio Somerville de la Universidad de Oxford. **Norman J. Zabusky**, que se doctoró en el Instituto de Tecnología de California en 1959, es profesor visitante en el departamento de física de la complejidad del Instituto Weizmann de Ciencias y profesor emérito en el departamento de ingeniería mecánica en la Universidad de Rutgers. **Bambi Hu**, doctor en 1974 por Cornell, da clases en el departamento de física de la Universidad de Houston. **David Campbell** se doctoró en la Universidad de Cambrigde en 1970, y ahora se halla adscrito al departamento de ingeniería eléctrica e informática de la Universidad de Boston. Los autores desean dedicar este artículo a Martin Kruskal (1925-2006), uno de los pioneros del estudio de las ondas solitarias.



8. DURANTE MUCHOS AÑOS se creyó que las vibraciones de un retículo regular —los átomos de un cristal perfecto, por ejemplo— tenían que extenderse por el espacio. Pero hace unos veinte años, físicos y matemáticos se percataron de que ciertos sistemas no lineales pueden mantener vibraciones espacialmente localizadas. Tales *modos intrínsecamente localizados* (MIL), también llamados *discrete breathers* (respiradores individuales), han sido ya observados experimentalmente en algunos sistemas físicos. Uno de tales sistemas está compuesto por una serie de barras micromecánicas en voladizo (*a la izquierda*). Cuando una viga está vibrando, se produce una atenuación en la luz que refleja, como puede verse en la imagen (*a la derecha*), lo que permite rastrear la evolución del sistema. Transcurridas algunas decenas de milisegundos, la vibración de las barras queda localizada, con el resultado de una línea horizontal oscura.

BARBARA AULICINO (*izquierda*); LA IMAGEN DE LA DERECHA, TOMADA DE MICROMECHANICAL OSCILLATOR ARRAY. M. SATO, B. E. HUBBARD, A. J. SIEVERS, B. ILIC, D. A. CZAPLEWSKI Y H. G. CRAIGHEAD EN *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, VOL. 90, PAG. 044102; 2003, HA SIDO FACILITADA POR LA AMERICAN PHYSICAL SOCIETY/*American Scientist*

el matemático francés J. B. Joseph Fourier introdujo una sencilla ley fenomenológica para describir el flujo del calor en sólidos. Todavía, a pesar de los dos siglos transcurridos, sigue siendo imposible deducir la ley directamente, por aplicación de primeros principios. Las tentativas a tal fin se remontan, por lo menos, hasta los estudios realizados por Peter Debye en 1914 sobre la conducción de calor en cristales dieléctricos. Debye proponía que la conductividad finita de tales cristales es consecuencia de interacciones no lineales en las vibraciones de sus retículos moleculares: exactamente el mismo tipo de fenómeno para cuyo sondeo fue concebido el estudio FPU.

Ha sido mucho el trabajo sobre la conducción del calor que se ha realizado utilizando modelos del tipo FPU, en los que cada extremo de la cadena se hallaba sumergido en un “baño térmico” (frío el uno, caliente el otro) y en los que cada masa experimentaba fuerzas que se sumaban a las procedentes de sus vecinas. Se han utilizado estos modelos para examinar la dependencia de la conductividad del número de masas y cuánto es el caos que existe en el sistema. Aunque son muchos e importantes los conocimientos que se han podido obtener, se desconoce todavía un sistema completo de condiciones necesarias y suficientes que garanticen la validez de la ley de Fourier. A los físicos les encantaría poder resolver esta embarazosa situación.

Respiradores

Decenios después, el problema FPU sigue inspirando estudios de sistemas no lineales no menos fascinantes; así, los retículos atómicos de la física de estado sólido. Hasta hace unos veinte años, se daba por seguro que las vibraciones de estos retículos habrían de extenderse a distancias muy grandes, en comparación con las distancias interatómicas. Las únicas excepciones reconocidas correspondían a defectos que destruían la regularidad de la disposición de los átomos en el retículo, debidos a contaminantes o a rupturas en un cristal, puro en todo lo demás. Se daba por sabido que tales irregularidades podrían provocar que las vibraciones no fuesen más que locales (a pesar de que trabajos anteriores de Zabusky y Deem apuntasen otra cosa).

Este enfoque quedó vuelto del revés por el descubrimiento de modos localizados de vibración en retículos perfectos. Tales modos, denominados *modos intrínsecamente localizados* (MIL) o, más coloquial y frecuentemente, *discrete breathers* —respiradores individuales—, pueden surgir en retículos espacialmente extendidos; en términos generales, desempeñan un papel similar al de los solitones en los sistemas físicos continuos. Empero, los MIL, a diferencia de los solitones, no tienen que propagarse: pueden limitarse a vibrar en un lugar. Hasta el presente, se han observado experimentalmente MIL en una variada colección de sistemas físicos, entre ellos sólidos de transferencia de carga, matrices de uniones Josephson, cristales fotónicos, estructuras micromecánicas oscilantes y condensados de Bose-Einstein.

¿Por que la no linealidad produce modos localizados de oscilación en un retículo? Para hacernos una idea, consideremos dos osciladores no lineales que interactúen débilmente. Recordemos que, debido a que esas oscilaciones son no lineales, la frecuencia de sus vibraciones depende de su energía. Imaginemos que uno de los osciladores es activado con una excitación fuerte y el otro con una débil, de suerte que casi toda la energía del sistema le corresponda en el arranque al primer oscilador. En teoría, podemos elegir estas excitaciones iniciales de manera que sus oscilaciones sean inconmensurables (haciendo que la razón de sus frecuencias de oscilación sea un número irracional). De proceder así, una vez lanzados ambos osciladores a sus

amplitudes máximas, nunca podrían volver a entrar en sincronía. Ello impide que las vibraciones del primer oscilador (o cualquiera de sus frecuencias armónicas) resuenen con alguno de los modos del segundo oscilador, lo que torna muy difícil la transferencia de energía entre los osciladores.

Consideremos ahora una cadena, dotada de numerosos osciladores. Pongamos en vibración a uno de ellos con una amplitud bastante grande y a una frecuencia inconmensurable con las frecuencias de las vibraciones, de menor amplitud que están experimentando los demás osciladores. Ese oscilador especial tiene dificultad en transferir parte alguna de su energía a sus vecinos. Así pues, este oscilador, y tal vez un reducido número de sus vecinos, mantiene una oscilación de gran amplitud durante un largo período, originando un MIL.

En 1998, Albert Sievers (Universidad Cornell) y Shozo Takeno (Universidad Técnica de Kyoto) demostraron la posibilidad de que surjan MIL en un retículo FPU. Se ha seguido investigando esta idea; se han logrado desarrollos nuevos y apasionantes. En particular, Sergej Flach, del Instituto Max Planck de Física de Sistemas Complejos, y sus colaboradores, en una serie de artículos publicados desde 2005, están proporcionando un nuevo enfoque sobre las recurrencias FPU, que son, en su opinión, resultado de la existencia de objetos llamados *q-breathers*. Uno de los problemas de investigación más activos en ciencia no lineal consiste en reconciliar la metodología de Flach para comprender la dinámica FPU con la anterior concepción, basada en los solitones.

En el horizonte

A lo largo del último medio siglo, en una miríada de investigaciones sobre el problema FPU y otros sistemas relacionados han ido tomando forma conceptos como los de caos, solitones y *breathers*, que han sido desarrollados, refinados y aplicados a cierto número de sistemas del mundo real.

El problema FPU incide en una gama de cuestiones de gran amplitud, concernientes a sistemas dinámicos no lineales, a la mecánica estadística y a la física computacional. No obstante, estas amplias categorías representan apenas una pequeña fracción de la bibliografía que el artículo FPU original ha engendrado. Se siguen publicando hoy nuevos estudios sobre el problema FPU, a pesar de los 54 años transcurridos desde aquel primer trabajo de Los Alamos. Tenemos plena confianza en que esta clase de estudios seguirá ocupando a los investigadores mucho después de que la ciencia celebre, en 2055, el centenario del problema FPU.

Bibliografía complementaria

STUDIES OF NONLINEAR PROBLEMS. I. Report LA-1940. E. Fermi, J. R. Pasta y S. Ulam. Los Alamos Scientific Laboratory; Los Alamos, 1955.

INTERACTION OF ‘SOLITONS’ IN A COLLISIONLESS PLASMA AND THE RECURRENCE OF INITIAL STATES. N. J. Zabusky y M. D. Kruskal en *Physical Review Letters*, vol. 15, págs. 240-243; 1965.

Q-BREATHERS AND THE FERMI-PASTA-ULAM PROBLEM. S. Flach, M. V. Ivanchenko y O. I. Kanakov en *Physical Review Letters*, vol. 95, pág. 064102; 2005.

WEAK AND STRONG CHAOS IN FERMI-PASTA-ULAM MODELS AND BEYOND. A. Pettini, L. Casetti, M. Cerruti-Sola, R. Franzosi y E. G. D. Cohen en *Chaos*, vol. 15, pág. 015106; 2005.

ENCYCLOPEDIA OF NONLINEAR SCIENCE. Dirigida por A. Scott. Routledge. Taylor & Francis Group; Nueva York, 2005.

DISCRETE BREATHERS: ADVANCES IN THEORY AND APPLICATIONS. S. Flach y A. V. Gorbach en *Physics Reports*, vol. 467, págs. 1-116; 2008.

THE FERMI-PASTA-ULAM PROBLEM: A STATUS REPORT. Compilación de G. Gallavotti. Springer; Berlín, Nueva York, 2008.

La educación secundaria en España

La información empírica disponible permite identificar el estado de la educación secundaria en España, desde una perspectiva internacional comparada, y avanzar propuestas para su mejora

Francisco López Rupérez

CONCEPTOS BASICOS

- La educación secundaria constituye la etapa en la que culmina la formación básica y en la que se manifiestan los errores y los aciertos acumulados en las etapas anteriores. Por ello es objeto de especial atención por parte de organismos internacionales como la OCDE o la Unión Europea.
- La Unión Europea ha referido a esta etapa educativa tres de los cinco indicadores de seguimiento de la Estrategia de Lisboa en materia de educación y formación: competencia lectora deficiente, abandono educativo prematuro y graduación en educación secundaria superior.
- Los Informes PISA de la OCDE permiten comparar el rendimiento de los estudiantes en lectura, matemáticas y ciencias. Cada edición centra sobre una de estas áreas la mayor potencia de los análisis cuantitativos (comprensión lectora en 2000, matemáticas en 2003, ciencias en 2006 y así cíclicamente).

Tanto los países más ricos como los que se encuentran en vías de desarrollo consideran la educación y la formación, su extensión cuantitativa y su mejora cualitativa como un elemento clave en los planos personal, social y económico, para la preparación de un futuro mejor.

En el marco de un estudio internacional sobre las ciudades y las regiones en la nueva economía, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) analizó en 2001 la relación existente entre el nivel educativo y el PIB *per capita* de 180 regiones de la Unión Europea. La conclusión obtenida es que, aun cuando la educación superior es importante a la hora de explicar el comportamiento económico de una región, lo es más aún la educación secundaria postobligatoria. Los autores del informe consideran que, si bien la primera resulta esencial de cara a la generación de conocimiento y a la innovación de alto nivel, la segunda facilita a la población competencias generales y de carácter intermedio que son decisivas para adaptarse a los cambios, aprender en la acción, promover innovaciones efectivas y gestionar con éxito los procesos productivos.

El presente artículo se propone revisar la situación de la educación secundaria en España y formular propuestas de mejora, basándose para ello en las evidencias empíricas que facilita la comparación internacional.

La educación secundaria en España

La educación secundaria en España está constituida por dos tramos o etapas; la primera, de carácter obligatorio (ESO), es común a todos los alumnos y comprende cuatro cursos que, en condiciones ordinarias, se desarrollan entre los 12 y los 16 años de edad y conducen al título de Graduado en Educación Secundaria Obligatoria. La culminación con éxito de esta etapa posibilita el acceso al tramo postobligatorio según dos vías alternativas, una de enseñanzas generales o *Bachillerato*, de dos años de duración, y otra de enseñanzas profesionales (Ciclos Formativos de Grado Medio) que incluyen las de artes plásticas y cuya duración puede ser de cuatro o de seis trimestres, en función de la especialidad. La nueva ordenación ha fijado su duración en dos mil horas, es decir, dos cursos académicos.

La Ley Orgánica de Educación (LOE, 2006) mantiene, en lo esencial, para la educación secundaria, la estructura definida en la anterior Ley Orgánica de Ordenación General del Sistema Educativo (LOGSE, 1990), vigente a estos efectos desde su promulgación. La aplicación de las modificaciones estructurales, previstas en la Ley Orgánica de Calidad de la Educación (LOCE, 2002), quedaron paralizadas en 2004 y derogadas en 2006, por efecto del cambio de partido en el Gobierno.

Cabe señalar la incorporación en la Ley vigente (LOE) de una nueva vía formativa a la Educación Secundaria Obligatoria inspirada en la Ley anterior. Está prevista para los alumnos mayores de 16 años (sólo excepcionalmente para los de 15) que no hubieran obtenido el título de Graduado en Educación Secundaria Obligatoria. Se trata de los Programas de cualificación profesional inicial que están dirigidos hacia la inserción sociolaboral y, sólo en algunos casos (restricción introducida por la

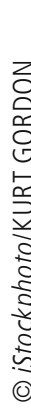
nueva Ley), a la obtención del título de Graduado en Educación Secundaria Obligatoria mediante algunas enseñanzas complementarias de carácter voluntario. Por ello, cabe decir que se sitúan con un pie dentro y otro fuera del sistema reglado y marcan, de hecho, el umbral de la infracualificación.

En lo que concierne a los contenidos, la LOGSE unificó, hasta los 16 años, las enseñanzas de carácter general con las de orientación profesional, que sin embargo estaban separadas, a partir de los 14, en la Ley General de Educación (LGE, 1970). Ello supuso la adopción de un modelo comprensivo que evita la diferenciación, tanto de los centros como de las enseñanzas, en toda la etapa educativa y adapta por consiguiente el currículo, sus materias y su desarrollo para hacerlos asequibles a la mayor parte de los alumnos.

La LOE mantiene, a este respecto, el espíritu de la LOGSE con dos salvedades prácticas: la anticipación a partir del segundo curso de los Programas de diversificación curricular y un tratamiento específico del cuarto curso. Los primeros equivalen, de hecho, a una adaptación adicional del currículo a aquellos alumnos con dificultades que hayan repetido y no estén en condiciones de promocionar al tercer curso; el segundo supone la asignación al último curso de la etapa de un carácter orientador tanto para los estudios postobligatorios como para la incorporación a la vida laboral.

Los contenidos del Bachillerato se organizan, según el sistema establecido por la LOE, en tres modalidades: Artes, Ciencias y Tecnología, y Humanidades y Ciencias Sociales; cada una se articula en materias comunes, materias de modalidad y materias optativas. Dos de las novedades introducidas para el Bachillerato por la nueva normativa consisten, por un lado, en incrementar, con respecto a la LOGSE, la capacidad que tienen los alumnos para configurar por ellos mismos su currículo pudiendo elegir entre la totalidad de las materias de modalidad establecidas y cursarlas en otros centros o mediante el procedimiento a

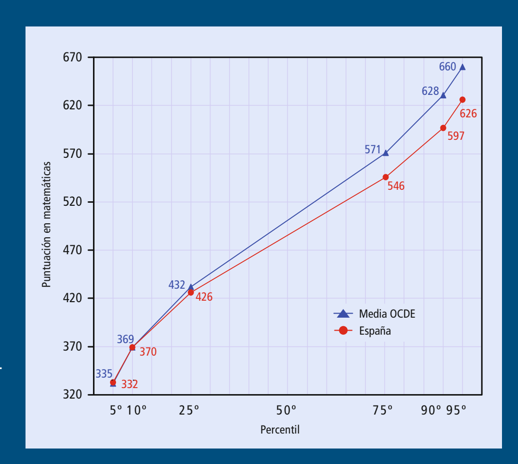
1. UNA EDUCACION SECUNDARIA DE CALIDAD y, a la vez, adaptada a las diferencias individuales de los alumnos prepara a los estudiantes para etapas formativas o laborales posteriores. En el plano colectivo, contribuye al desarrollo económico de un país y a su cohesión social.



COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS PISA

AREAS	PISA 2000		PISA 2003		PISA 2006	
	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica
Lectura	493	85	481	95	461	89
Matemáticas	476	91	485	88	480	89
Ciencias	491	95	487	100	488	91

La tabla resume los resultados de las evaluaciones PISA 2000, 2003 y 2006. La educación secundaria obligatoria española presenta un rendimiento mediocre, inferior a la media de la OCDE (500), y relativamente homogéneo, con una desviación típica inferior a la media (100). En el ámbito de la comprensión lectora, se observa un progresivo empeoramiento entre 2000 y 2006.



La gráfica muestra un análisis comparado de las distribuciones de puntuación en matemáticas por percentiles. España logra una mayor homogeneidad de resultados en PISA 2003 frente a la media de los países de la OCDE, no por efecto de una elevación de las puntuaciones inferiores sino por una reducción de las superiores.

FRANCISCO LOPEZ RUPEREZ

distancia, en el caso de que el centro propio no ofreciera las elegidas por los alumnos. Y, por otro, en permitir cursar parte del segundo año hasta con cuatro asignaturas pendientes del curso anterior (esta posibilidad ha quedado en suspenso por una sentencia reciente del Tribunal Supremo).

En lo que respecta a los Ciclos Formativos de Grado Medio, sus contenidos son los propios de la formación profesional, según un catálogo amplio de especialidades organizado en familias profesionales. El currículo correspondiente incluye una fase de prácticas, de un trimestre de duración, en centros de trabajo.

Los dos tipos de enseñanza secundaria postobligatoria conducen a su propio título: las de Bachillerato desembocan en el Título de Bachillerato y las de Formación Profesional de Grado Medio culminan con la obtención del Título de Técnico correspondiente. El primero abre la vía a la prosecución de estudios superiores, sean universitarios, sean de formación profesional de grado superior. El segundo se orienta exclusivamente al mundo del trabajo.

El abandono educativo temprano

La Unión Europea viene prestando un especial interés a este fenómeno cuyo control realiza con la ayuda de un conocido indicador estructural de cohesión social que ha sido incorporado al seguimiento de la llamada Estrategia de Lisboa en materia educativa. La "tasa de abandono educativo temprano" se define como el porcentaje de la población entre 18 y 24 años que, o bien ha abandonado el sistema escolar sin terminar la Educación Secundaria Obligatoria o, en caso de graduarse, no prosiguió estudios postobligatorios ni realizaba actividades de formación en los seis meses anteriores a la realización de la encuesta correspondiente.

Treinta y uno de cada cien españoles pertenecientes a ese grupo de edad se encontraban en esta situación en 2007, frente a los sólo 15 de la Unión Europea de 27 países. El dato, además, ha empeorado en 2 puntos porcentuales desde el año 2000 y se sitúa bastante alejado del nivel de referencia (10 por ciento) correspondiente a uno de los objetivos acordados por la Unión Europea para 2010.

El nivel educativo de los jóvenes

Que la mayor parte de la población logre, al menos, la educación secundaria postobligatoria constituye otro de los objetivos de mejora educativa de la Unión Europea. Para el seguimiento de este segundo objetivo se ha recurrido a un indicador de resultados, la tasa de graduación en educación secundaria postobligatoria o superior, que se identifica con el "Nivel educativo de los jóvenes". Se define como el porcentaje de la población comprendida entre los 20 y 24 años que ha alcanzado el nivel de educación secundaria superior. Para este indicador se ha adoptado un valor del 85 por ciento como meta o nivel de referencia de la Unión de cara a 2010. España se encontraba en 2007 en una posición del 61,1 por ciento, situada por debajo de la media europea (78,1 por ciento) y también por debajo de su propia posición en 2000 (66,0 por ciento).

Ambos fenómenos (abandono educativo temprano y graduación en secundaria superior) están relacionados entre sí; los altos valores del primer indicador explican, en buena medida, los bajos valores del segundo. En el caso español, ello se refleja claramente en su distribución territorial por comunidades autónomas. Así, Andalucía, Murcia, Castilla la Mancha, Canarias, Baleares, la Comunidad Valenciana y Extremadura presentan tasas de abandono educativo temprano por encima de la media nacional y, por consiguiente, tasas de graduación en educación secundaria postobligatoria inferiores a dicha media.

Los informes PISA

La OCDE y todos sus países miembros impulsaron, a finales de los noventa, el desarrollo del Programa para la Evaluación Internacional de los Alumnos (PISA), que se ha convertido ya en una referencia ineludible en la comparación internacional del rendimiento de los sistemas educativos. Centrado en los alumnos de 15 años, PISA pretende, sobre todo, medir el efecto educativo acumulado a una edad que, para una buena parte de los países, marca el final de la educación secundaria obligatoria. Se trata de evaluar en qué medida el sistema educativo garantiza a toda la población escolar los conocimientos y las competencias que resultarán imprescindibles para la vida adulta. Las tres áreas principales de evaluación son las de lectura, matemáticas y ciencias.

Una primera aproximación a los resultados de PISA 2000, PISA 2003 y PISA 2006 indica que el rendimiento del sistema educativo español, medido a los 15 años de edad, es bastante mediocre (puntuaciones por debajo de la media de los países de la OCDE) y relativamente homogéneo (las diferencias entre alumnos son inferiores a las de la media europea). Esa "mediocridad homogénea" aparece como un rasgo de nuestra educación secundaria obligatoria relativamente estable en el tiempo, a excepción del área de lectura, cuyos resultados presentan un empeoramiento progresivo a lo largo del intervalo de seis años considerado.

Existe una relación estadística sustantiva entre el nivel socioeconómico y sociocultural familiar de los alumnos y su rendimiento académico, de modo que, a igualdad de todo lo demás, cuanto menor es aquél menor es éste. Con el propósito de contribuir a la elucidación de esta relación, la OCDE ha definido un índice compuesto que incluye el estatus ocupacional de los padres, su nivel de estudios y los recursos culturales disponibles en el hogar.

La fuerza de la relación entre nivel socioeconómico y rendimiento escolar presenta, para España y para la media europea, respectivamente, los siguientes valores porcentuales: 16 y 20 (PISA 2000, lectura), 14,0 y 20,3 (PISA 2003, matemáticas) y 13,9 y 14,4 (PISA 2006, ciencias). Esta variable, externa al medio escolar aunque tributaria de él y de su grado de eficacia, puede explicar una parte significativa de nuestras diferencias de rendimiento con respecto a la media de la OCDE, aunque su impacto sobre los resultados escolares sea notablemente menor que en la media europea. A pesar de la fuerza de dicha relación, los resultados indican que existe un amplio margen de actuación sobre el resto de las variables que influyen sobre los resultados escolares. Hay, pues, soporte empírico suficiente para eludir el determinismo social siempre que la educación como institución social sea eficaz.

La Unión Europea ha recurrido también a las pruebas de PISA a la hora de definir un indicador de rendimiento y fijar un objetivo (o nivel de referencia) para 2010, en el marco de la Estrategia de Lisboa. Por su papel central en relación con el resto de los aprendizajes, la Unión eligió la competencia lectora que incluye la identificación de información en un texto escrito, su interpretación y la reflexión sobre su contenido. De los cinco niveles de competencia definidos en la prueba, se ha tomado como base del correspondiente indicador el porcentaje de alumnos que presentan un nivel de competencia igual o inferior al primero (el más bajo de los niveles) y se ha acordado para 2010 un nivel de referencia del 15,5 por ciento de los alumnos. España ha empeorado su situación a este respecto al pasar de un 16,3 (PISA 2000)

2. EL ANALISIS DE LA EVOLUCION de once países desarrollados entre 1970 y 1994, en lo que concierne a las relaciones entre incremento del gasto y mejora del rendimiento, muestra que la mayor parte de los países empeoraron sus resultados en ese intervalo de tiempo a pesar de haber incrementado, en ocasiones de forma notable, el gasto por alumno. Suecia, Holanda e Italia mejoraron aunque muy débilmente en comparación con la magnitud del esfuerzo económico realizado.

PAISES	LA PARADOJA DEL GASTO EDUCATIVO		
	Variación rendimiento escolar (%) 1979-1994	Incremento real gasto/alumno (%) 1979-1994	Incremento real PIB *pc* (%) 1979-1994
Australia	–2,3	269,8	46,4
Nueva Zelanda	–9,7	222,5	24,3
Francia	–6,6	211,6	60,7
Italia	1,3	125,7	74,6
Alemania	–4,8	108,1	66,8
Japón	–1,9	103,3	100,7
Reino Unido	–8,2	76,7	58,3
Bélgica	–4,7	64,7	68,0
Holanda	1,7	36,3	52,9
EE.UU.	0	33,1	70,5
Suecia	4,3	28,5	35,1

FUENTE: UNESCO (2004), *Education for All. The Quality Imperative. EFA Global Monitoring Report 2005*. París

a un 25,7 por ciento (PISA 2006). Es decir, la cuarta parte de nuestros alumnos de 15 años tienen un nivel de competencia lectora igual o inferior al mínimo establecido.

El debate suscitado en España con respecto a la importancia o no de nuestra posición retrasada en ese *ranking* internacional de rendimiento escolar puede ser iluminado por el juicio al respecto de la propia OCDE. En su reciente publicación *OECD Economic Surveys. SPAIN*, de noviembre de 2008, al referirse al sistema de educación y de formación como ámbito prioritario de reformas para la mejora del sistema económico español, el autor del informe emite el siguiente diagnóstico con respecto a nuestra posición en PISA:

> *"España ocupa una de las posiciones más bajas entre los países de la OCDE con alto nivel de ingresos, si bien está situada junto a otros muchos países cerca de la media... No obstante, los resultados de PISA muestran que existe un considerable espacio para la mejora. El rendimiento es, en términos relativos, más débil en lectura y se ha deteriorado drásticamente desde 2000, con un incremento de la proporción de alumnos que fallan a la hora de adquirir las competencias lectoras básicas."*

Gasto en educación y resultados escolares

Aun cuando existe cierta correlación estadística entre gasto educativo y rendimiento escolar, la fuerza predictiva de dicha relación es limitada. A partir de los resultados de PISA, la OCDE efectúa análisis de regresión entre el gasto por alumno acumulado hasta los 15 años por el sistema educativo y el rendimiento medido por sus pruebas. Los resultados demuestran que menos de la quinta parte de las diferencias entre países, en cuanto al rendimiento escolar, puede ser explicada por diferencias en sus niveles de gasto por alumno acumulado a los 15 años. Ello indica que hay países que hacen más con menos y otros que hacen menos con más y sugiere que existe un margen amplio para la mejora de los resultados escolares operando sobre otros factores relevantes.

Esa relativa debilidad en la fuerza de la relación entre ambas variables en los países desarrollados ha llevado a la Organización a reconocer que, aun cuando un nivel adecuado de gasto en educación es condición necesaria de la calidad educativa no es, en modo alguno, condición suficiente.

La UNESCO, en su informe de 2005 sobre el seguimiento global de la iniciativa mundial EFA, en favor de la Educación Para Todos, señala la "paradoja del gasto" en educación al mostrar, para un grupo representativo de los países desarrollados, cómo un aumento notable del gasto educativo efectuado a lo largo de un cuarto de siglo no ha llevado consigo mejoras proporcionales en el rendimiento académico de sus escolares, produciéndose en algunos casos empeoramientos.

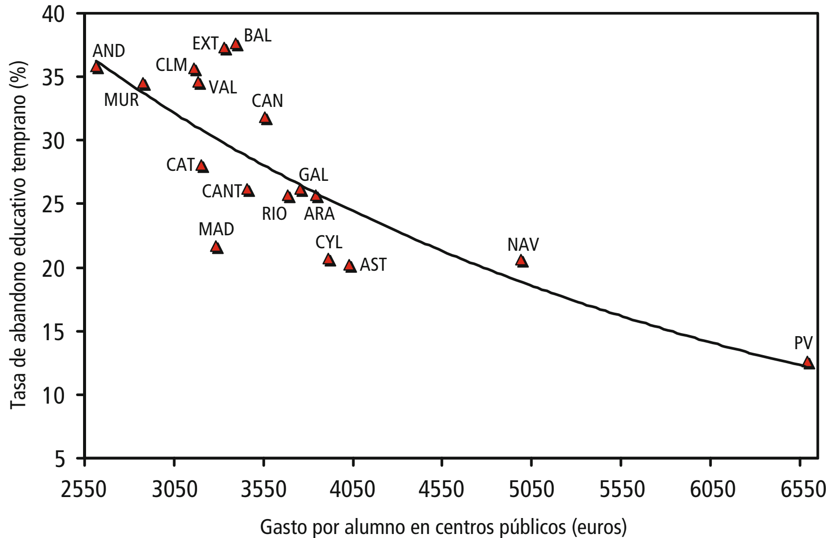
Una ampliación del rango de la variable "gasto educativo", mediante la incorporación a los análisis de países de menor nivel de desarrollo, permite resolver esa aparente paradoja. Se aprecia entonces que la relación entre rendimiento y gasto dibuja una curva cuya pendiente, pequeña en los países desarrollados, va incrementándose conforme se desciende en el nivel de gasto educativo. Opera, pues, también aquí la "ley de los rendimientos decrecientes": la influencia de la variable gasto sobre la variable resultados disminuye con el incremento de gasto educativo, hasta llegar a un valor a partir del cual grandes inyecciones de recursos producirán, en el mejor de los casos, pequeños avances en materia de resultados escolares.

En este punto del análisis emerge la cuestión de si la variable gasto educativo en España constituye aún un factor relevante sobre el que se debe operar con el fin de mejorar los resultados del sistema educativo.

El informe más reciente (2008) de la OCDE sobre indicadores de educación ofrece al respecto cifras que facilitan la comparación internacional. El gasto educativo público en centros de enseñanza no universitarios en porcentaje del PIB se situaba en 2005 en el 2,8 por ciento, un punto por debajo de la media de la OCDE (3,8 por ciento) y por debajo también de la Unión Europea de 19 miembros (3,6 por ciento). Sin embargo, cuando se refiere el gasto

3. CUANDO SE AMPLIA EL RANGO DE LA VARIABLE "gasto educativo por alumno", incorporando a los análisis países de menor nivel de desarrollo, se advierte que la relación entre gasto y rendimiento es curvilínea, de modo que la influencia del gasto sobre los resultados escolares aumenta conforme disminuye éste. En otros términos, a partir de un determinado nivel de gasto, grandes incrementos de recursos producirán, en el caso más favorable, pequeñas mejoras en los resultados.

FRANCISCO LOPEZ RUPEREZ



FUENTE: *F. López Rupérez.* El legado de la LOGSE - *Gota a Gota, Madrid, 2006.*

4. LA RELACION entre tasa de abandono educativo temprano y gasto por alumno en centros públicos para el conjunto de las comunidades autónomas muestra un comportamiento no lineal. De nuevo, ello parece indicar que la importancia del gasto aumenta en la medida en que disminuyen los recursos que se ponen a disposición del sistema.

por alumno al PIB *per capita* (indicador que refleja de un modo más fiel la capacidad de un país para gastar), la situación de España en los niveles no universitarios de enseñanza se sitúa en la media, o muy próximo a la media, de los países de la OCDE. Ello comporta una llamada de atención sobre la necesidad de mejorar la eficiencia del gasto y no sólo el gasto mismo en la educación secundaria, sobre todo en un período como el presente, de profunda crisis económica.

No obstante ese retraso relativo en materia de gasto educativo referido al PIB, España muestra una ventaja comparativa con respecto a los valores medios de la OCDE (2006), precisamente en las variables de "entrada", o de recursos, que operan en el núcleo de los procesos de enseñar y aprender. Así, por ejemplo, el número de horas de clase por año en la Educación Secundaria Obligatoria es superior a la media (979 frente a 910); el número de alumnos por aula en centros públicos es inferior en Educación Primaria (19,3 frente a 21,5) e igual en la Secundaria Obligatoria (23,8); el número de alumnos por profesor es inferior a la media tanto en la Primaria (14,2 frente a 16,2) como en la Secundaria Obligatoria (12,5 frente a 13,3) y en la Secundaria Postobligatoria (7,8 frente a 12,6) y el salario de los profesores en el inicio de la carrera es un 25 por ciento superior a la media de la OCDE.

Por otro lado, cuando se considera la estructura del gasto se advierte que España concentra su gasto por alumno en aquellos recursos que tienen una incidencia directa sobre la enseñanza. Así, mientras que la media de los países de la OCDE dedica el 85 por ciento del gasto por alumno en educación primaria y secundaria a servicios educativos básicos centrados en la instrucción, España invierte en ese capítulo el 96 por ciento de dicho gasto.

Por otra parte, el 27 por ciento de alumnos de las enseñanzas primaria y secundaria sostenidas con fondos públicos se escolarizan en centros privados concertados; pero el coste por alumno para las arcas públicas se sitúa, en promedio, en el 50 por ciento del gasto realizado en los centros públicos. Cálculos sencillos permiten concluir que si la financiación pública del puesto escolar en la enseñanza concertada se elevara hasta alcanzar el nivel de la enseñanza pública, el gasto educativo español (en porcentaje del PIB) crecería en 0,4 puntos porcentuales.

Ello explica, en parte, nuestro inferior nivel de gasto educativo público (en porcentaje del PIB) con respecto a la media, sin que se pueda inferir un impacto negativo sobre los resultados escolares. A la vista de los datos disponibles, desagregados por tipo de centro, el rendimiento de los alumnos españoles escolarizados en centros concertados es igual, o ligeramente superior, al de los escolarizados en centros públicos cuando se controla la influencia del nivel socioeconómico de las familias.

La distribución regional del gasto educativo muestra, sin embargo, diferencias considerables entre comunidades autónomas, lo que, a pesar de lo anterior, abre una puerta a la posibilidad fundada de mejorar los resultados por la vía del incremento de gasto, si se apela a esa conexión de carácter no lineal entre gasto por alumno y rendimiento escolar más arriba descrita.

Esas notables desigualdades regionales en gasto educativo explican, en cierta medida, las diferencias existentes entre comunidades autónomas en cuanto a tasas de abandono educativo temprano y podrían estar contribuyendo, aunque no en solitario, a nuestra inferior posición

5. ASEGURAR una buena formación en matemáticas, en ciencias y en tecnología constituye una de las prioridades de la Estrategia de Lisboa. Ello requiere, como en ninguna otra área, el desarrollo en los estudiantes de los valores del esfuerzo, la autoexigencia y la perseverancia, desde la educación básica.

en materia de resultados del sistema educativo en el contexto de la Unión.

El problema de la estructura

A pesar de las diferencias existentes entre los sistemas educativos de los distintos países de la Unión Europea, el análisis comparado muestra que la edad media de iniciación de la educación secundaria inferior se sitúa en los 11,3 años y su duración media es de 3,6. El inicio de la educación secundaria superior se produce, en promedio, a los 15,1 años para la de carácter general y a los 15,2 para la profesional, siendo las duraciones promedio de la educación secundaria superior para ambos tipos de estudios secundarios de 3,3 y 3,2 años respectivamente.

La confrontación de esos datos con los de nuestra educación secundaria revela una estructura atípica para el caso español, con la existencia de un retraso en la edad de inicio de la educación secundaria superior y de un claro acortamiento de esta etapa educativa con respecto a la media de los países de la Unión Europea. Ambas circunstancias podrían estar indicando el camino de futuras reformas orientadas a reducir el abandono educativo temprano y a mejorar el potencial formativo de la educación secundaria.

Otro aspecto que merece alguna atención es la edad a la que se produce la primera diferenciación curricular, es decir, aquella en la que los alumnos deben optar entre diferentes tipos de estudios. En nuestro país, el adelanto de ese "punto de bifurcación" en la trayectoria escolar ha sido objeto de controversia, por la prolongada prevalencia de un modelo que retrasa dicha edad hasta los 16 años sin haber demostrado empíricamente su ventaja. De ese modo, España se sitúa en el reducido grupo de países desarrollados que más retardan esa decisión. La OCDE no ha podido establecer una relación entre esta variable y el rendimiento escolar a los 15 años, medido mediante las pruebas de PISA.

Con todo, es posible explorar el impacto diferido de la primera diferenciación curricular sobre la capacidad del sistema educativo para retener en su seno y cualificar durante más tiempo a los alumnos de educación secundaria. El resultado es que los países de la Unión Europea donde se introduce dicha diferenciación antes de los 13,7 años (valor medio de la Unión) presentan tasas de abandono educativo temprano bajas o muy bajas. Ello podría estar indicando la ventaja de estos sistemas a la hora de evitar dicho fenómeno y promover, por consiguiente, el acceso a los estudios secundarios postobligatorios y su terminación.

Los defensores de una diferenciación tardía invocan argumentos de equidad, de no segregación en la elección del tipo de estudios, que se produce, a la postre, en función del nivel socioeconómico o sociocultural de los alumnos o de su clase social; pero no se puede ignorar el factor de infracualificación asociado al abandono educativo temprano que constituye, en el momento presente, el principal problema de equidad del sistema educativo español y una grave amenaza al futuro de nuestro desarrollo económico y de nuestra cohesión social.

Una solución de compromiso, que permitiría atender ambas exigencias, consiste en adelantar a los 15 años esa edad sin reducir la extensión de la enseñanza obligatoria, dotar al Bachillerato de tres años de duración y organizarlo en dos modalidades paralelas: el general y el profesional.

La cuestión de los incentivos

Investigaciones recientes han señalado, entre los factores explicativos del fenómeno del abandono educativo temprano, las bajas expectativas de las familias con respecto a la prosecución de los estudios de sus hijos y el llamado "coste de oportunidad", esto es, la pérdida de ingresos que comporta cualquier retraso en su incorporación al trabajo. Se hace, pues, necesario hacer más atractivo, para este sector de alumnos, la perspectiva de continuar en el sistema reglado de educación y formación, mediante la profundización en modelos formativos compuestos escuela-empresa, el establecimiento de contratos laborales de formación (desde los 16 años) que aumenten el incentivo económico de dichas fórmulas y la oferta de becas-salario, vinculadas al nivel socioeconómico y al aprovechamiento, para las enseñanzas secundarias postobligatorias. Se trata, en definitiva, de desplazar los in-

El autor

Francisco López Rupérez es doctor en ciencias físicas. Ha sido Consejero de Educación en las Delegaciones Permanentes de España ante la OCDE y ante la UNESCO. Actualmente es Presidente del Consejo Escolar de la Comunidad de Madrid.

centivos desde el exterior del sistema reglado a su interior.

Con el fin de evitar obstáculos que, sin ser necesarios, resultan disuasorios para ese tipo de alumnos, es preciso, asimismo, hacer más flexible y atractivo el sistema de formación reglada, mediante el establecimiento de pasarelas entre la formación profesional de grado medio y la de grado superior, y entre ésta y los estudios técnicos universitarios temáticamente próximos, de conformidad con la perspectiva conceptual que ofrece la formación a lo largo de la vida ("lifelong learning").

La influencia de los valores

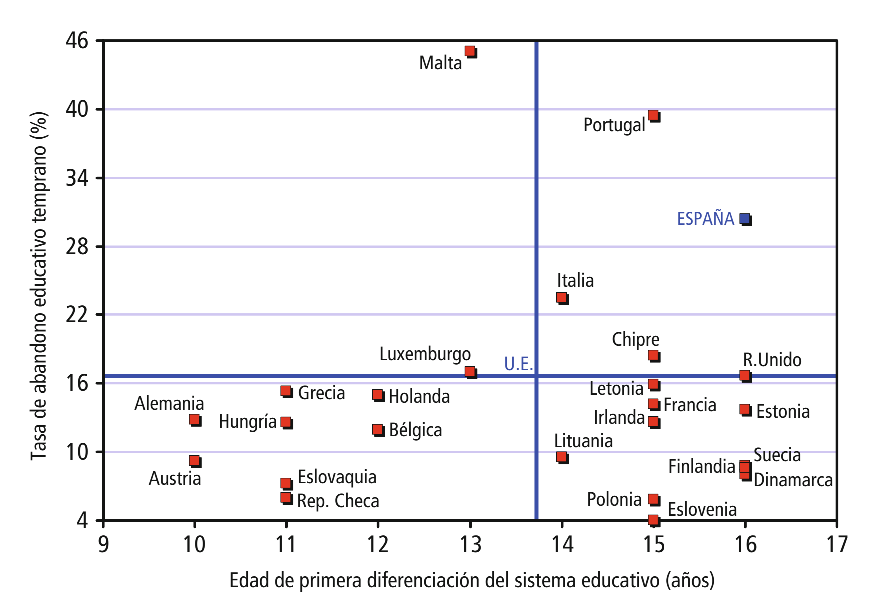
Un estudio publicado por el autor y realizado a partir de la base de datos de PISA 2003 ha permitido identificar qué factores relativos al medio escolar contribuyen a explicar nuestra posición en matemáticas inferior a la media de los países de la OCDE y, sobre todo, a la de Finlandia, el país campeón.

De los análisis cuantitativos emergen con claridad, como elementos explicativos, el escaso compromiso de los alumnos con la tarea de estudiar, el menor sentido del esfuerzo, la menor motivación personal, el peor autoconcepto, un clima escolar más disruptivo, una moral del profesorado más baja y una menor autonomía de los centros. Dejando a un lado el último factor, que tiene que ver con políticas de carácter organizativo, el resto de los factores parecen conectarse entre sí y con los resultados en una especie de "ovillo causal", de modo que el escaso interés de los alumnos empeora el clima escolar y reduce la moral del profesor. Esas tres circunstancias empeoran los resultados académicos, lo que actúa retroactivamente sobre la moral, tanto de alumnos como de profesores, contribuyendo a un empeoramiento adicional del rendimiento según un círculo vicioso.

Cuando se considera la naturaleza de los factores debidos a los alumnos, se advierte que aluden, directa o indirectamente, a ese mundo precario de valores que ha anidado en el medio escolar español.

La influencia de los valores sociales sobre el funcionamiento de la institución escolar y sobre sus resultados ha sido invocada a la hora de explicar el mejor comportamiento de unos países frente a otros en materia de rendimiento de sus sistemas educativos. Tiene, probablemente, su máxima expresión en el caso de las culturas asiáticas, como la china o la japonesa, en donde la idea de que el esfuerzo y la perseverancia son las claves del éxito personal constituye un elemento esencial de socialización. Ambos rasgos de la conducta del individuo son considerados obligaciones morales.

FRANCISCO LOPEZ RUPEREZ



FUENTE: *F. López Rupérez.* El legado de la LOGSE - *Gota a Gota; Madrid, 2006*

6. LA RELACION entre la tasa de abandono educativo temprano y la edad de primera diferenciación del sistema educativo indica que el grupo de países que diversifican antes retienen con mayor éxito a sus jóvenes en formación en el seno del sistema reglado. Ignorando el caso extremo y poco significativo de Malta, la casi totalidad de estos países presenta tasas de abandono educativo temprano por debajo de la media. Por el contrario, una fracción significativa de los países que diversifican a una edad superior a la media obtiene tasas de abandono educativo elevadas.

Razonamientos similares, relacionados con la herencia religiosa de algunos países occidentales que obtienen buenos resultados en las evaluaciones internacionales, son traídos a colación entre los expertos como probables factores de fondo, explicativos de ese rendimiento superior de sus sistemas educativos. La convicción de que existe una relación positiva entre el esfuerzo y la capacidad individual, de que la inteligencia puede mejorarse por medio del entrenamiento y la perseverancia, forma parte de la filosofía educativa de estas sociedades y del código de valores compartidos en sus centros docentes.

Para lograr una recuperación generalizada de los valores que están en la base misma del desarrollo personal y del éxito escolar, la coherencia en los planteamientos de los diferentes agentes constituye un factor de eficacia primordial. Es preciso que aparezcan, sin ambigüedad, en el frontispicio de las leyes, se trasladen a la sociedad, se asuman por las familias, se ordenen en políticas y prácticas educativas y formen parte efectiva del *éthos* escolar. Si no se alcanza esa coherencia —que en éste como en otros ámbitos de la realidad es sinónimo de potencia y efectividad— será muy difícil hacer avanzar el sistema educativo español, de un modo razonablemente homogéneo y eficaz, hacia la mejora de sus resultados.

Bibliografía complementaria

PREPARAR EL FUTURO. LA EDUCACION ANTE LOS DESAFIOS DE LA GLOBALIZACION. F. López Rupérez. La Muralla; Madrid, 2001.

EL LEGADO DE LA LOGSE. F. López Rupérez. Gota a Gota; Madrid, 2006.

EDUCATION FOR ALL. THE QUALITY IMPERATIVE. EFA GLOBAL MONITORING REPORT 2005. UNESCO; París, 2004.

LEARNING FOR TOMORROW'S WORLD. FIRST RESULTS FROM PISA 2003. OECD; París, 2004.

EDUCATION AT A GLANCE. OECD INDICATORS 2008. OECD; París, 2008.

Café turco centrifugado

Las partículas permanecerán suspendidas en un fluido si son lo bastante pequeñas. Para que sedimenten, puede aumentarse artificialmente la gravedad mediante el centrifugado

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

¿Cómo se separan de un fluido las partículas en suspensión? Los adictos al café turco nos responderán que basta con esperar unos instantes, que es lo que hacen cuando les sirven la bebida. Los granos de café finamente molidos se posan lentamente en el fondo de la taza bajo el efecto de la gravedad. Sin embargo, cuando las partículas son muy pequeñas, permanecen indefinidamente en suspensión. ¿Por qué? ¿Cómo se remedia?

Examinemos el comportamiento de las partículas sumergidas en un líquido en función de su tamaño. En una taza de café, cada grano sufre dos fuerzas por parte del agua circundante: el empuje de Arquímedes y una fuerza de rozamiento opuesta a su velocidad. La presión de un líquido aumenta con la profundidad, por lo que las distintas superficies de un objeto sumergido se hallan sometidas a una fuerza tanto mayor cuanto más profundas se encuentren. En total, el objeto sumergido sufre una fuerza dirigida hacia arriba, el empuje de Arquímedes, igual al peso del volumen de líquido desplazado. Los granos de café enteros flotan, pues son menos densos que el agua: el café torrefacto es un material poroso que contiene mucho aire (un 50 por ciento aproximadamente). Cuando se muele lo bastante fino, todos los poros se abren al agua y se llenan. El café se torna así algo más denso que el agua: el empuje de Arquímedes ya no compensa más que el 80 del peso de la partícula y ésta se hunde.

A la caída de las partículas se opone...

La fuerza de rozamiento se debe a la viscosidad del fluido. Como los granos son pequeños y poco rápidos, el movimiento del fluido en torno al grano no es turbulento. En este tipo de movimiento, de baja velocidad, la fuerza de rozamiento es proporcional a la velocidad del grano y a su diámetro. Sometido a su peso (menos el empuje de Arquímedes), el grano cae; su velocidad aumenta hasta que la fuerza de rozamiento se hace igual y opuesta al peso. Como éste es proporcional al volumen del grano y el rozamiento es proporcional a su diámetro, la velocidad límite de caída es proporcional al cuadrado del diámetro del grano. Por tanto, cuanto más fino es el grano, más tarda en sedimentar.

En el café de molido grueso, los granos, de un milímetro de diámetro aproximadamente, sedimentan a una velocidad de diez centímetros por segundo. Sólo una fuerte agitación (la acción de la cuchara) puede mantener ese café en suspensión en el agua durante más de algunos segundos. Con su diámetro de 0,2 milímetros, los granos del café turco se posan a una velocidad de algunos milímetros por segundo. ¿Qué pasa con nuestros glóbulos rojos, con su diámetro de micras? El mismo cálculo que para los granos de café (suponiendo que las partículas son esféricas) da una velocidad de sedimentación de cuatro milímetros por hora, cifra cercana a la que se reputa normal en hematología (diez milímetros la primera hora).

Al degustador de café turco no le basta la paciencia, necesita también calma. Si la bebida se agita, los granos se dispersan otra vez. A causa de la viscosidad, un movimiento del fluido arrastrará en parte a los granos pese a la gravedad, y tanto más cuanto más pequeñas sean las partículas. Nuestro adicto al café turco debe por ello aguardar algunos minutos antes de degustarlo, mientras

1. En una taza de café, el empuje de Arquímedes (*en rojo*) no contrarresta del todo el peso (*en negro*) de los granos, y éstos caen al fondo tanto más lentamente cuanto más finos sean, a la vez que el agua ejerce sobre ellos una fuerza de rozamiento (*en verde*). Cuando se agita el líquido con una cuchara o sacudiéndolo, ese movimiento se transmite por viscosidad a los granos, que vuelven a dispersarse en el líquido.

BRUNO VACARO

2. El movimiento browniano de los granos, debido a los múltiples choques que sufren con las moléculas (*en azul*) del líquido circundante, se opone al proceso de sedimentación por gravedad.

Además, los granos se distribuyen a lo largo de una altura tanto mayor cuanto más ligeros sean. Esa altura se reduce aumentando artificialmente, por centrifugado, la fuerza de "caída".

espera a que el fluido se inmovilice. El mismo fenómeno es responsable de la dispersión del polen en la atmósfera. El aire es 1000 veces menos denso que el agua y 55 veces menos viscoso. Por tanto, para partículas del mismo tamaño, la sedimentación es mucho más rápida en el aire. Sin embargo, los granos de polen son bastante más pequeños que los de café molido y sedimentan a una velocidad del mismo orden de magnitud: llegan al suelo en decenas de segundos. Pero la menor brisa ascendente puede mantenerlos en suspensión; basta para transportar los granos de polen —o de contaminantes— a centenares de kilómetros de distancia y a 2000 metros de altitud.

...el movimiento browniano

Para que sedimenten las partículas pequeñas, es indispensable que el fluido se halle en reposo; pero ¿es posible el reposo absoluto? En 1828, el botánico escocés Robert Brown observó al microscopio que los granos de polen en suspensión acuosa se desplazaban sin parar de un modo desordenado. La clave del fenómeno, tal como demostró Einstein en 1905, está en la naturaleza discontinua de la materia, constituida por moléculas y átomos que se mueven incesantemente por efecto de la agitación térmica. El desequilibrio de los choques de las moléculas de fluido contra el grano impulsa a éste unas veces en una dirección, otras veces en otra. La partícula se mueve así según una trayectoria aleatoria, conocida como movimiento browniano, que se opone a la sedimentación.

En un medio a temperatura uniforme, todas las partículas, microscópicas o macroscópicas, tienen la misma energía cinética media, proporcional a la temperatura. Esa energía permite elevarse a las partículas y favorece su dispersión en el fluido. ¿A qué altura suben? Escribiendo que la energía potencial adquirida es igual a la energía cinética inicial (proporcional a la temperatura), resulta que la altura característica es igual al cociente de la energía cinética por el peso de la partícula. Para granos de café en agua, es inferior al tamaño de un átomo; ni que decir tiene que los granos no se mueven del fondo de la taza. Para los glóbulos rojos, esa altura alcanza algunas micras; mas para otro componente de nuestra sangre, la albúmina (una proteína), es de varios metros. Por último, el mismo cálculo indica que las partículas atmosféricas se distribuyen a lo largo de una altura de unos ocho kilómetros, lo que coincide con las observaciones.

El movimiento browniano no representa papel alguno en nuestro café turco, pero permite que las proteínas permanezcan en suspensión en el plasma sanguíneo sin posarse. ¿Cómo se pueden separar entonces esas macromoléculas? Como la altura característica disminuye con el peso, basta con aumentar éste para forzar la sedimentación. Nada más fácil con una centrifugadora: la rotación induce una pseudogravedad, de aceleración igual al cuadrado de la velocidad de rotación por el radio. Se obtienen sin dificultad fuerzas 100.000 veces superiores al peso (a 30.000 vueltas por minuto y diez centímetros del eje de rotación). Las macromoléculas se concentran entonces en el fondo del tubo centrifugado. O sea, que ya sabe usted qué hacer si su café está demasiado molido: centrifúguelo.

Los prisioneros y María

Un problema matemático y uno filosófico

Agustín Rayo

Para la columna de este mes, he elegido dos acertijos. El primero es un problema puramente matemático, y tiene una solución apodíctica. El segundo es un problema filosófico. La solución no es apodíctica, pero a mí me parece fascinante.

Según entiendo, el autor del primer problema es Rohit Parikh, de la Universidad de la ciudad de Nueva York; el segundo problema deriva de un argumento de Frank Jackson, de la Universidad Nacional Australiana y la Universidad de Princeton.

Problema 1: Los prisioneros

En una habitación hay tres prisioneros. Los tres cierran los ojos; a cada uno se le pone un sombrero rojo o azul. El guarda tira una moneda para decidir qué sombrero ponerle a cada prisionero.

Una vez que los prisioneros tienen los sombreros puestos, se les permite abrir los ojos. Cada uno puede ver los sombreros de sus colegas, pero no el sombrero propio. A partir de ese momento no se permite ningún tipo de comunicación entre prisioneros. El guarda conduce a cada prisionero a una celda individual. Le pregunta en privado: "¿De qué color es tu sombrero?" Si los tres rehúsan contestar, se les mata a todos. Si alguno de los tres contesta incorrectamente, se les mata a todos. Si al menos uno contesta correctamente (y nadie contesta incorrectamente), se les deja a todos en libertad. Las celdas están suficientemente separadas para que ninguno de los prisioneros pueda enterarse de qué contestaron los demás o si rehusaron contestar.

Está claro que existe una estrategia que les permitiría a los prisioneros sobrevivir con una probabilidad del 50 %. Podrían escoger a un "capitán" de antemano, y acordar que sólo el capitán contestará a la pregunta del guarda. Dado que el capitán no conoce el color de su sombrero, contestará al azar. Y dado que se utilizó una moneda para escoger el color de su sombrero, la probabilidad de que acierte será del 50 %.

Problema: A pesar de que nadie sabe el color de su sombrero cuando el guarda hace la pregunta, existe una estrategia (acordada de antemano entre los prisioneros) que les da una probabilidad de supervivencia de más del 50 %. ¿Cuál es la estrategia?

Problema 2: María y el tomate

María es una gran científica, una experta mundial en la ciencia del color. Ha adquirido un conocimiento profundo del tipo de condiciones perceptivas bajo las cuales tenemos la experiencia de ver rojo y del tipo de estado cerebral en el que nos encontramos cuando sentimos tales experiencias.

Tristemente, María nunca ha experimentado el rojo. Desde pequeña ha estado confinada a una celda en la que hay sólo objetos blancos y negros. Todo lo que sabe sobre el color lo ha aprendido en los libros de papel blanco y tinta negra que sus captores le han permitido leer.

Un día se le informa a María que se le permitirá ver un tomate rojo. Antes de mirar el tomate, María tiene toda la información física pertinente al caso. No sólo sabe que el tomate es rojo: sabe precisamente qué longitudes de onda reflejará, cómo estimulará esa luz su retina y qué estados cerebrales serán consecuencia del estímulo. Pero nunca ha experimentado la sensación de ver un objeto rojo y tener esos estados cerebrales.

Problema: Cuando finalmente se le muestra el tomate a María, ¿aprenderá algo nuevo acerca de cómo es el mundo, algo que no esté implícito en lo que sabía antes del experimento?

(Piense su respuesta con cuidado. Si responde "no", tendrá que explicar cómo es que María puede descubrir qué es lo que se siente viendo rojo sin aprender nada nuevo acerca de cómo es el mundo. Pero si responde "sí", se comprometerá con la idea de que una descripción completa del mundo no puede ser una descripción en términos puramente físicos, pues pensará que, antes de ver el tomate, María ignoraba algo acerca de cómo es el mundo a pesar de que po-

¿Quiere saber más?

El caso de María ha generado mucha discusión. Una buena sinopsis es: Byrne, A. "Review of Ludlow, Nagasawa y Stoljar (coord.), *There's Something About Mary*", *Notre Dame Philosophical Reviews* 2006.01.20. <http://ndpr.nd.edu/review.cfm?id=5561>

1. ¿Qué estrategia podrían acordar de antemano los prisioneros para tener una probabilidad de supervivencia mayor al 50 %?

seía toda la información física relevante al caso.)

Solución del problema 1

La estrategia es muy sencilla. Cada prisionero deberá responder a la pregunta del guarda sólo si ve que sus colegas tienen sombreros del mismo color. En ese caso, su respuesta deberá ser "rojo" si ve dos sombreros azules, y "azul" si ve dos sombreros rojos. (El resultado de implementar esta estrategia está representado en la figura 1.)

Es fácil verificar que la probabilidad de que los prisioneros sobrevivan utilizando esta estrategia es del 75 %. Dado que se tiraron monedas para decidir qué sombrero ponerle a cada prisionero, la distribución de sombreros representada por cada uno de los renglones de la figura 1 tiene la misma probabilidad de resultar. Y los prisioneros se salvan en seis de los ocho renglones, es decir, el 75 % de las veces.

La razón por la que me gusta este problema es que los prisioneros consiguen mejorar las probabilidades colectivas de supervivencia sin mejorar sus probabilidades individuales de responder acertadamente. Hemos visto que la probabilidad de que los prisioneros sobrevivan es del 75 %. Pero cuando uno de ellos ve que los sombreros de sus colegas son del mismo color, y se prepara para responder a la pregunta del guarda, sabe que la probabilidad de acertar es sólo del 50 %.

Imaginemos cómo se ve la situación desde la perspectiva de uno de los prisioneros. Cuando C abre los ojos y ve dos sombreros del mismo color recibe una mala noticia, pues si viera sombreros de colores diferentes sabría que se va a salvar. La probabilidad de recibir esta mala noticia es del 50 % porque corresponde a la mitad de los renglones de la tabla inferior (los renglones 1, 2, 7 y 8). Una vez que la mala noticia ha sido recibida, C sabe que la probabilidad de contestar incorrectamente es otra vez del 50 %. En otras palabras, C morirá si tiene mala suerte dos veces: primero viendo dos sombreros del mismo color y después contestando incorrectamente. Cada una de las malas noticias tiene una probabilidad del 50 %; y son independientes; por tanto, la probabilidad de morir es 50 % × 50 % = 25 %.

2. ¿Aprende María algo acerca de cómo es el mundo cuando ve un objeto rojo por primera vez?

Solución del problema 2

Antes de que María vea el tomate, ¿sabe de qué color es? En un cierto sentido, es obvio que la respuesta es "sí". Si le preguntáramos "¿De qué color es el tomate que estamos por mostrarte?", respondería sin titubear "¡Rojo!".

Pero ahora imaginemos que —antes de mostrarle el tomate— le enseñamos una pelota roja y una verde, y le preguntamos "¿Cuál de estas pelotas es del mismo color que el tomate que estamos por mostrarte?" María no sabría la respuesta. En este otro sentido, no sabe de qué color es el tomate.

La situación de María es similar a la de un niño que sabe que un terreno cuadrado mide 10 m de lado, pero ignora cuál es el área del terreno porque no sabe multiplicar. En cierto sentido, el niño conoce el tamaño del terreno: es capaz de responder a la pregunta "¿Qué longitud tiene cada lado del terreno?" Pero en otro sentido no conoce el tamaño del terreno, pues si preguntáramos por el área no sabría qué decir, a pesar de que no hay ninguna diferencia entre un terreno cuadrado con 10 m de lado y un terreno cuadrado con 100 m^2 de área.

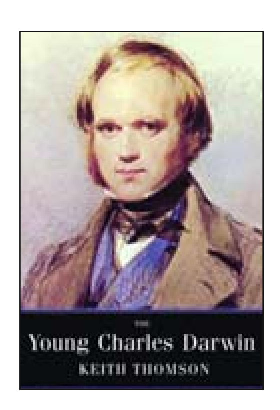
La ignorancia del niño no es ignorancia acerca de cómo es el mundo: no es ignorancia acerca del tamaño de terreno. Se trata más bien de una deficiencia en sus capacidades de procesamiento de información. No es capaz de utilizar información que ya tiene —que el terreno mide 10 m de lado— para ciertos propósitos; por ejemplo, el de decidir cuántos metros cuadrados de césped haría falta comprar para cubrir el terreno.

A María le sucede algo similar. No es capaz de utilizar información que ya tiene —que el tomate es rojo y que ver rojo consiste en estar en tal-y-cual estado cerebral— para ciertos propósitos: por ejemplo, el de decidir cuál de las dos pelotas presenta el mismo color del tomate.

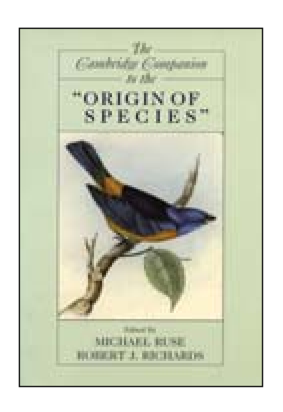
Cuando María ve el tomate, no aprende nada nuevo acerca de cómo es el mundo. Pero adquiere nuevas capacidades de procesamiento de información. En eso consiste saber qué se siente viendo rojo.

Sombrero de A	Sombrero de B	Sombrero de C	Resultado de implementar la estrategia
Rojo	Rojo	Rojo	Los tres contestan incorrectamente
Rojo	Rojo	Azul	C contesta correctamente
Rojo	Azul	Rojo	B contesta correctamente
Rojo	Azul	Azul	A contesta correctamente
Azul	Rojo	Rojo	A contesta correctamente
Azul	Rojo	Azul	B contesta correctamente
Azul	Azul	Rojo	C contesta correctamente
Azul	Azul	Azul	Los tres contestan incorrectamente

Agustín Rayo es profesor de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.



THE YOUNG CHARLES DARWIN,
por Keith Thomson. Yale University Press; New Haven, 2009.



CAMBRIDGE COMPANION TO THE "ORIGIN OF SPECIES".
Dirigido por Michael Ruse y Robert J. Richards. Cambridge University Press; Cambridge, 2009.

Darwin

Gestación y análisis de la teoría de la evolución

En la serie de reseñas que a lo largo del año hemos venido dedicando a la teoría de Darwin, no podían faltar los libros de cabecera, sobre la gestación de la misma (*The Young Charles Darwin*) y el análisis de su formulación (*The Cambridge Companion to the "Origin of Species"*). Charles Robert Darwin, nacido en 1809, publicó su obra emblemática a los cincuenta años. Murió en 1882, cuando el *Origen* andaba ya en la sexta edición y habían adquirido difusión otros dos tratados importantes, *The Descent of Man* (1871) y *The Expression of the Emotions in Man and Animals* (1872).

Sin brillar en la escuela, Darwin entró en la Universidad de Edimburgo para estudiar medicina, decisión tomada por su padre para él y para su hermano mayor. En 1825, constaba de cuatro facultades: filosofía y letras, teología, derecho y medicina. Darwin se matriculó en el curso de anatomía, fisiología y patología de Alexander Monro; en el de farmacología (*De materia medica*), que impartía Andrew Duncan, en el de medicina clínica enseñada por Robert Graham y William Alison, y en el de química, explicado por Thomas Charles Hope. Se apuntó también en asistencia hospitalaria. El más brillante del claustro quizá fuera Hope, que había descubierto el estroncio y observado que el agua se expandía a medida que se iba congelando, alcanzando su máxima densidad a los 4 grados, razón de que la superficie de un estanque se congele antes y de que floten los icebergs.

Se inscribió también en el servicio de préstamo de la biblioteca universitaria, donde acudiría con frecuencia en busca de libros de historia natural; entre otros, *The Philosophy of Zoology* (1822) de John Fleming, las *Illustrations of the Linnean Genera of Insects* (1821) de William Wood, *The Animal Kingdom* (1792) de Robert Kerr e *Introduction to Conchology* (1815) de Samuel Brooke. En Edimburgo comenzó a redactar sus cuadernos de campo.

En su segundo curso, empezado en octubre de 1826, frecuentó las clases de Robert Jameson sobre historia natural, que avivó su interés por la transmutación de las especies. Director del *Edinburgh New Philosophical Journal*, creador de un espléndido museo natural, autor de un manual canónico de mineralogía y fundador de la Sociedad Werneriana de historia natural, Jameson se había encargado de la versión inglesa de las obras de Georges Cuvier. Había estudiado con Jacob Gottlob Werner en la Escuela de Minas de Friburgo. Los wernerianos sostenían que las rocas más antiguas se habían originado a través de procesos desarrollados en el agua. Eran neptunistas. Se les oponían los vulcanistas (Hope, uno de ellos), que atribuían los procesos geológicos al calor.

Darwin trabó estrecha amistad con Robert Edmond Grant, que se había formado en zoología en París. Conocedor profundo de corales, esponjas, briozoos y otros organismos marinos inferiores, Grant compartía con Etienne Geoffroy de St. Hilaire la tesis de que la estructura de los animales podía contemplarse como variaciones de un número restringido de temas o planos. Geoffroy proponía la existencia de cuatro temas: radiados, moluscos, articulados y vertebrados. Andando el tiempo, pensó reducirlos a un solo plano. Darwin halló en Grant su mentor. De hecho, le hizo crecer de mero recolector a naturalista.

La evolución no le era cuestión desconocida. Su abuelo, Erasmus Darwin, autor de *Zoonomía* y *The Temple of Nature*, defendía que la vida había surgido de un proceso de cambio continuo a partir de un precursor único. Todos los organismos vivos y fósiles se hallaban emparentados. Jean Baptiste de Lamarck trenzaba ideas semejantes a las de Erasmus en *Système des animaux sans vertèbres* (1801), que desarrolló en su *Philosophie zoologique*, de 1809. En opinión de Lamarck, las especies no se extinguieron, sino que se transformaron en otras. Atribuyó una fuerza determinante al medio y a la herencia de los caracteres adquiridos. A principios del siglo XIX hubo más autores que propusieron explicaciones evolucionistas que dieran cuenta de la creciente complejidad de los organismos fósiles. Algunas hipótesis propusieron la doctrina de la degradación como mecanismo justificativo, una doctrina coherente con quienes imaginaban una creación perfecta en el comienzo de los tiempos.

Darwin abandonó Edimburgo en abril de 1827. Pese a su manifiesta repugnancia a las clases en general y las de medicina en particular, no fue un mal estudiante. Nos han llegado algunos de sus apuntes de las clases de Monro y de Hope. Se compró el *The Edinburgh New Dispensary.* Su aversión a la cirugía hospitalaria en una época anterior a la anestesia fue lo que terminaría por inducirle a dejar la carrera de medicina.

Se matriculó en teología, con la intención de asegurarse el futuro en una vicaría anglicana. En enero de 1828 se inscribe en el Christ's College, de Cam-

bridge. Compaginó un primer curso anodino con la intensificación del estudio de los insectos. El coleccionismo de insectos comportaba una vertiente intelectual y teórica. La obra de MacLeay *Horae Entomologicae* generó una ola de interés. En ella se abordaba un tema clásico de zoología y botánica: descubrir un método natural de clasificación. MacLeay y Darwin en ese tiempo creían que todas las especies habían sido creadas individualmente por Dios, que dejó a los científicos la formidable tarea de recomponer el rompecabezas de las especies. William Sharp MacLeay, en su sistema quinario, establece cinco grupos centrales (Acrita, Mollusca, Vertebrata, Annulosa y Radiata) y cinco "osculantes", o fronterizos entre dos (Tunicata, Cephalopoda, Annelida, Cirripedia y Zoanthida).

Decisiva, ya en el segundo año, fue su amistad con John Stevens Henslow, preste y docente de mineralogía y botánica, que le invitaba a las tertulias vespertinas de los viernes, celebradas en su casa. Allí conoció a Adam Sedgwick, George Peacock y John Herschel. Darwin progresaba en su formación naturalista y se mostraba ya capaz de descubrir variedades entre especies. Aunque no le atraía la carrera eclesiástica, había logrado, al menos, forjarse en una metodología científica disciplinada.

Si Henslow mostraba interés por la variabilidad intraespecífica, Sedgwick buscaba el encaje de la geología en el marco religioso, pretensión ésta que no acaba de convencer a Charles Lyell, discípulo del oxoniense William Buckland. El principio central de Lyell era el uniformitarismo: la Tierra se habría ido configurando por las mismas fuerzas que vemos operativas ahora, con la misma cadencia e intensidad. No había grandes convulsiones catastróficas. La Tierra estaba conformada por procesos de elevación y subsidencia, desencadenados por terremotos, erosión y deposición de sedimentos. La naturaleza de las especies, el Diluvio, el desarrollo progresivo, la edad e historia de la Tierra y la transmutación de las especies constituían temas de activo debate en Cambridge en 1831.

Para recibir su bachillerato en artes, abril de 1831, Darwin hubo de examinarse de lenguas clásicas (Homero y Virgilio), de matemática (Euclides y álgebra) y de filosofía (John Locke). Y era obligado haberse sumergido en las doctrinas del maestro de Cambridge William Paley, expuestas en *A View of the Evidence of Christianity* (1794) y *The Principles of Moral and Political Philosophy* (1764).

Bajo la guía de Henslow, Darwin se enfrascó en lecturas muy significativas. Abre, de Jonh Herschel, sus *Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy*, que expone la naturaleza del método científico; relee, de Alexander von Humboldt, su *Personal Narrative of a Journey to the Equinoctial regions of the New Continent*, y disfruta con *Natural Theology; or Evidences of the Existence and Attributes of the Deity*, de William Paley. En julio de ese mismo año, Sedgwick lo invitó a su campaña de campo en el norte de Gales, para estudiar in situ areniscas rojizas del Devónico. Pero el viaje que iba a resultar decisivo para Darwin sería el del *Beagle*, recomendado por Henslow.

La aventura del *Beagle,* más allá de la misión asignada por el almirantazgo (circunnavegación y revisión de los mapas de América del Sur) escondía un primer aliciente: la emancipación como científico, lejos del abrigo de Cambridge. Así, la lectura de los *Principles of Geology* (1830-33) le indujo a adoptar el uniformitarismo y despojarse del catastrofismo de Sedgwick. No se hizo evolucionista durante el viaje, pero en su mente entraron preguntas y dudas.

En sus cuadernos de apuntes (enero de 1837 a junio de 1838) Darwin comenzó a trabajar sobre diferentes vías para explicar el cambio de las especies. En un principio supuso que las especies podrían crearse para un tiempo determinado, de suerte que cumplido ese plazo se extinguirían y otras ocuparían su lugar. Más tarde abandonó la idea de la senescencia de las especies y reflexionó, a la manera lamarckista, sobre la influencia directa del medio, en particular el calor y la electricidad. Pero con el tiempo le dio vueltas a las posibilidades del ejercicio para la heredabilidad de los caracteres.

Hasta finales de septiembre de 1838, Darwin se centró en el tema. Inspirado en Newton, buscaba una fuerza motriz de la evolución, similar a la fuerza de la gravitación. En sus cuadernos encontramos reflejado su progreso gradual. Partía del trabajo de los mejoradores de plantas y animales, para cotejarlo luego con lo que acontecía en la naturaleza. La lectura, a finales de septiembre, del *Essay on the Principle of Population*, de Thomas Malthus, constituyó una auténtica revelación: le llevaría al descubrimiento del papel de la selección. Muchos organismos nacen y se reproducen. Los que lo consiguen son, en promedio, los dotados con determinadas características: piernas más fuertes, ojos más agudos, que resultan ser cruciales. En el transcurso de generaciones estas características terminarán por imponerse.

En 1842 Darwin esbozó las líneas generales de su teoría en el *Sketch*, que se transformaría en un *Essay* de 230 páginas en 1844. Luego se entregó al estudio de los percebes. Hasta que sus amigos le instaron, ocho años más tarde, a que perfilara su teoría que se proponía resolver, por fin, el "misterio de los misterios". Y en su pormenorizada redacción se encontraba cuando llegó el manuscrito de Alfred Russel Wallace, que le obligó a sintetizarla en lo que hoy conocemos por *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*.

En la primera sección del *Sketch* y del *Essay* y en el primer capítulo del *Origin*, Darwin pasaba revista a la selección artificial. Sugería en un principio que la variabilidad de los caracteres en plantas y animales se producía como resultado de la acción del medio de dos formas diferentes: una, inmediata, por las condiciones del entorno que incidían en el cuerpo maleable de la joven progenie; otra, mediata, a través de la acción del medio sobre los órganos sexuales de los progenitores. Creía Darwin que la variabilidad en la naturaleza se producía con idéntica fuerza que en las granjas domésticas.

En el *Origin* sostenía que todos los organismos vivos y extintos son resultado de un proceso gradual y lento de desarrollo a partir de formas mucho más simples; es decir, que toda la vida, por razón de su descendencia a partir de unos cuantos antepasados, está emparentada. Propuso también un mecanismo, la selección natural, significando que sólo unos cuantos sobreviven y se reproducen, y que el éxito en ese proceso es, en promedio, una función de los rasgos distintivos de los organismos; en el transcurso del tiempo, eso conduce al cambio, cambio que está en la dirección de la adaptación. Ojos, oídos, hojas, troncos, alas, aletas: ésas son las cosas producidas en el curso de la evolución y esas cosas son cruciales para la supervivencia y la

reproducción. Reconoce un segundo mecanismo como fuerza de cambio, la "selección sexual".

Darwin admite que, aunque no podemos contemplar la evolución de la perfección a través del tiempo, podemos observarla en el espacio, mediante la instalación de series de organismos existentes, desde el más elemental hasta el más complejo. También la conducta está sometida a la selección y a la evolución. En el caso de los organismos sociales (hormigas y abejas), la selección opera sobre la colonia.

A las pruebas paleontológicas recabadas en la Patagonia, Darwin sumó la distribución geográfica, hondamente impresionado por la distribución de aves y reptiles en el archipiélago de las Galápagos. ¿A qué se debía tanta diferencia de pinzones y tortugas? ¿Por qué no había tanta diversidad en el continente? ¿Por qué se parecen los animales de las Galápagos a los animales de América del Sur y no a los de Africa? ¿Por qué los de las islas Canarias son como los de Africa y no como los de América del Sur? También el mundo de las plantas ocupa un lugar central en su teoría. Pasa revista al papel de la mejora vegetal como fuente de variabilidad y de la conversión de las variantes en especies distintas.

John Hedley Brooke, al estudiar el papel de la religión en el *Origin*, recuerda el tránsito del autor desde el anglicanismo literal de su adolescencia hasta el deísmo de su viaje en el *Beagle*, para recalar en el agnosticismo del final de sus días. Durante la redacción del *Origin* Darwin no era ateo, ni siquiera agnóstico; defiende una suerte de deísmo que libera a Dios de los detalles, aunque lo coloca en la trastienda de la excelencia del mundo vivo. Por fin, ni Darwin era un filósofo, ni el *Origin* un tratado de pensamiento. Siempre, no obstante, pugnó por dotar de rigor a su argumentación.

Luis Alonso

ENTRE LA CIENCIA Y EL CRIMEN: MATEU ORFILA Y LA TOXICOLOGÍA EN EL SIGLO XIX,

Dirigido por José Ramón Bertomeu Sánchez y Agustí Nieto Galán. Fundación Dr. Antonio Esteve [Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, n.º 6], 2006.

Mateu Orfila

Sentando cátedra en París

La figura del médico legista Mateu J. B. Orfila i Rotger, nacido en Mahón en 1787 y muerto en París en 1853, donde desarrolló su vida y sus actividades profesionales desde 1807, resulta sorprendentemente desconocida por la historiografía internacional y, algo menos, en España. En efecto, la enjundiosa introducción con que Rafael Huertas prologó una recopilación de textos del toxicólogo legista, publicada en 1988 (*Orfila, saber y poder médico*. Madrid: CSIC [Estudios sobre la Ciencia, 2]) revisó las viejas aproximaciones hispánicas a su figura, tanto como otras más modernas francesas; en todo caso, advirtió la ausencia de análisis de la dimensión de Orfila como químico y explícitamente la postuló como un objetivo para historiadores de la ciencia especializados.

El presente libro reúne, en castellano, parte de los contenidos de una reunión internacional celebrada en la ciudad natal de Orfila en 2004, que, bajo la coordinación de los editores, reunió a historiadores de la ciencia y de la medicina españoles y de diversos países europeos para discutir acerca de las relaciones entre medicina, química y tribunales de justicia en torno a la personalidad del mahonés. Los frutos de dicha reunión han visto la luz en idioma inglés (Bertomeu, Nieto, eds. *Chemistry, medicine and crime. Mateu J. B. Orfila and his times*, Sagamore Beach, MA: Science History Publications; 2006), una obra que ha merecido reseñas elogiosas en las principales revistas de historia de la ciencia y la medicina.

Como se nos advierte en el Prólogo del texto que comento, esta reunión ha servido de punto de partida para un ambicioso programa de investigación, que se completa en colaboración de la Biblioteca interuniversitaria de Medicina de París con la puesta al alcance del público, a través de Internet, de la obra completa del mahonés, incluyendo su correspondencia, así como bibliografía crítica en torno al mismo. Por la orientación como historiadores de la química de los coordinadores, parece que el reto planteado por Huertas ha sido recogido a la altura de los tiempos.

El presente Cuaderno de la Fundación Esteve recoge, en castellano como he dicho antes, trabajos que se dedican a analizar la contribución toxicológica de Orfila (recuérdese que toxicología y alienismo o psiquiatría fueron las dos ramas que contribuyeron a la construcción del peritaje médico-legal), en el contexto sociocientífico internacional. Son sus autores F. Chavaud, A. Crowther, B. Wahring, K. D. Watson, J. R. Bertomeu, I. A. Bruney y S. Tomic. Se completa con una excelente introducción de los coordinadores, que delimita los problemas y presenta las principales líneas de exploración.

El conjunto, pese a la múltiple autoría, resulta particularmente bien trabado para producir la comprensión del lugar que ocupó Orfila en la medicina francesa y europea de su época. La relación de química y medicina a la luz de la investigación experimental sobre venenos —a su vez derivada de la química de los principios inmediatos tal y como se configuró una vez descubiertos los alcaloides vegetales a comienzos del ochocientos—, bajo el foco público de la participación como expertos ante los tribunales de justicia en casos criminales, se plantea de manera atractiva y detallada. También se analizan los problemas derivados de las técnicas empleadas, esos "objetos fronterizos", lo que complementa perfectamente los análisis de las doctrinas publicadas, y se subraya convenientemente la dimensión experimental con animales de su práctica científica, de donde nace la gran pregunta sobre la falta de consideración historiográfica que se ha prestado a esta línea de trabajo en relación con la formación de la fisiología experimental contemporánea.

En suma, una obra colectiva de gran interés y rigurosa elaboración, que debe estar en todas las bibliotecas especializadas.

Esteban Rodríguez Ocaña

EN EL PROXIMO NUMERO DE SEPTIEMBRE 2009

Biocarburantes celulósicos,

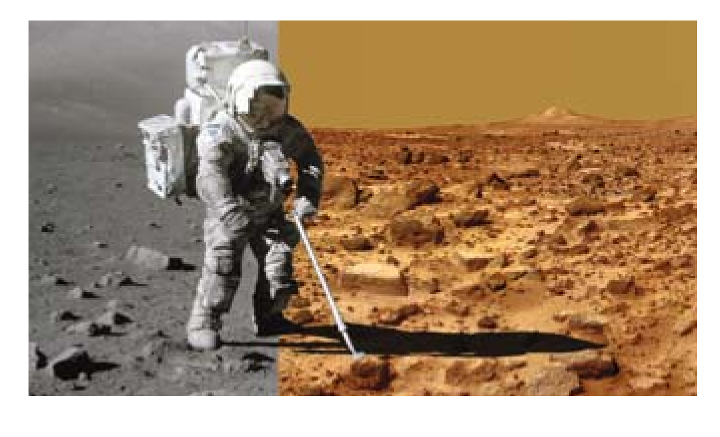
por George W. Huber y Bruce E. Dale

Los científicos transforman los residuos agrícolas, la madera y las hierbas de crecimiento rápido en una amplia gama de biocombustibles. Pero antes de que se generalice su consumo, deberán competir con los precios del petróleo.

De la Luna a Marte,

por Harrison H. Schmitt

El único geólogo de campo que participó en una expedición a la Luna ofrece algunos consejos a quienes algún día visiten Marte.



Los orígenes del telescopio,

por Sven Dupré

Ya en la Antigüedad se encontraba muy extendido el uso de espejos. Las gafas de lectura se inventaron en Italia en el siglo XIII y se expandió muy pronto su comercialización. Sin embargo, el telescopio tardaría más de trescientos años en llegar. ¿Por qué hubo que esperar tanto?

El origen de la vida,

por James Trefil, Harold J. Morowitz y Eric Smith

Sobre el descenso de electrones en el metabolismo primitivo.

Nuevas tácticas contra bacterias resistentes,

por Christopher T. Walsh y Michael A. Fischbach

Se están aplicando enfoques y técnicas novedosas en la búsqueda de antibióticos.